







Géosciences pour une Terre durable

PREFET DE LA REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON



Evolution à long terme des morphologies côtières sur le littoral du Languedoc-Roussillon

Rapport final

BRGM/RP- 62921 -FR Novembre 2013

Étude réalisée dans le cadre des projets de Service public du BRGM 2011 - 11LITA09

A. Stépanian et Y. Balouin

Vérificateur :

C. Mallet

Approbateur :

M. Audibert

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique, l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Mots clés : trait de côte, évolution morphologique, long terme, Languedoc-Roussillon, littoral

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Stépanian A. et Balouin. (2013) – Evolution à long-terme des morphologies côtières sur le littoral du Languedoc-Roussillon. Rapport BRGM/RP-62921-FR ; 68 p., 40 ill..

© BRGM, 2013, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

La prévision du devenir à long-terme du trait de côte et des morphologies littorales reste un des enjeux majeurs de la recherche en géomorphologie littorale, en raison de ses implications en termes de planification territoriale, et ceci d'autant plus dans un contexte de remontée globale du niveau marin. Pour appréhender cette évolution de manière quantitative, les méthodologies traditionnellement employées en ingénierie côtière font appel à différentes formules empiriques, comme l'extrapolation des tendances historiques mesurées sur une période passée, et des modèles semi-empiriques, basés essentiellement sur la règle de Brüun (1962). Ces modèles sont particulièrement intéressants dans la mesure où ils prennent en compte un paramètre vitesse d'élévation du niveau marin, ils peuvent être ainsi employés pour tester les impacts sur l'évolution du trait de côte de différents scénarios climatiques en termes de ralentissement, stagnation ou accélération de la remontée du niveau marin.

L'objectif de la présente étude est de proposer une méthodologie pertinente d'utilisation de ces modèles semi-empiriques pour évaluer leur efficacité et leur intérêt sur le littoral du Languedoc-Roussillon en termes de capacités de prévision de l'évolution à long terme du littoral régional. Réalisé dans le cadre des « Etudes stratégiques et prospectives sur l'évolution des risques littoraux » du volet « Gérer durablement le Littoral » du Contrat de Projet Etat-Région, ce projet, cofinancé par la Région Languedoc-Roussillon, l'Etat et la dotation de Service Public du BRGM, concerne la tâche 2 de l'action 5 du Module « Développement et partage de la connaissance ».

Les résultats de cette étude ne peuvent pas être directement utilisés à des fins réglementaires de type PPRL, la méthodologie utilisée ne répond pas aux recommandations de la circulaire ministérielle de juillet 2012. En revanche, cette méthode est complémentaire et vise à préciser le rôle de l'élévation du niveau de la mer dans les évolutions futures du littoral du Languedoc-Roussillon

Une première analyse visant à tester l'ensemble des outils de caractérisation de l'évolution du trait de côte a été réalisée sur les secteurs de Port-Barcarès et de Canet en Roussillon a mis en évidence que la formulation de Brüun corrigée des tendances historiques est celle qui reproduit de la manière la plus satisfaisante les évolutions constatées sur une période de simulation de 1942 à 2010.

Par la suite, l'application de cette formulation a été effectuée pour quatre sites considérés comme représentatifs des grands types morphologiques du littoral régional :

 Leucate, pour le type « Roussillonnais » d'Argeles-sur-mer au Cap de Leucate, avec des plages relativement étroites composées de sables moyens à grossiers, présentant un profil sous-marin à deux barres festonnées et un domaine dunaire peu développé ;

- Gruissan pour le type « Narbonnais » entre le Cap Leucate et Saint-Pierre-sur mer, avec des plages plutôt larges et constituées de sables fins à moyens, présentant par endroits des constructions dunaires développées et des systèmes de barres sous-marines internes linéaires et externes festonnées ;
- Sète et Carnon Petit-Travers pour le type « Sétois », qui s'étend du Cap d'Agde à la pointe de l'Espiguette, représentatifs de plages de sables fins le long d'un lido fortement aménagé, avec une dune peu développée, une plage émergée assez étroite, et des barres sous-marines le plus souvent rectilignes.

La comparaison des résultats entre chacun des sites permet d'extraire une hiérarchie des paramètres principaux ou secondaires sur l'évolution future du trait de côte, et en particulier le facteur vitesse de remontée du niveau marin.

Bien que les barres sous-marines jouent un rôle essentiel dans la dynamique sédimentaire côtière, notamment par leur rôle protecteur (atténuateur de houle) et de stock sédimentaire, l'utilisation des modèles ne révèle pas d'influence évidente dans les différents scénarios projetés. En effet, ces barres sont considérées comme pérennes dans le passé et donc dans le futur également. A l'inverse de la morphologie du cordon dunaire, qui conditionne fortement les zones vulnérables du littoral où le trait de côte est susceptible de décrocher dans le futur, en particulier au niveau des zones basses en aval des ouvrages. Le rôle des ouvrages, prépondérant sur l'évolution historique du littoral du Languedoc-Roussillon et son érosion chronique, est lui intégré dans le paramètre « taux d'évolution historique ». Enfin, la différence entre le recul attendu pour les scénarios optimiste (40 cm d'élévation du niveau marin en 2100) et pessimiste (1 m d'élévation du niveau marin en 2100), et le recul global permet de déterminer la contribution du facteur vitesse de remontée du niveau de la mer. Ainsi, les sites les plus sensibles à une variation de remontée du niveau marin sont le littoral du Narbonnais (Gruissan) et le Golfe d'Aigues Mortes (Petit-Travers). Pour ces deux sites, ce facteur compte ainsi pour 50% environ du recul global.

Les formulations semi-empiriques sont au final intéressantes dans une perspective de travail sur la caractérisation d'un aléa « recul du trait de côte ». Elles donnent ainsi des indications supplémentaires et pertinentes pour corriger « à dire d'expert » une cartographie initiale issue d'une simple projection mathématique des tendances historique, en particulier dans l'identification des zones vulnérables au recul chronique, liées à des morphologies dunaires abaissées et/ou hétérogènes.

Sommaire

1.	Introduction	9
2.	Les sites retenus et leur évolution historique	13
	2.1. LE LITTORAL DE LEUCATE 2.1.1. Description 2.1.2. Dynamique de l'évolution littorale	15 15 17
	2.2. LE LITTORAL DE GRUISSAN2.2.1. Description2.2.2. Dynamique de l'évolution littorale	20 20 23
	2.3. LE LITTORAL DE SETE2.3.1. Description2.3.2. Dynamique de l'évolution littorale	26 26 31
	2.4. LE LITTORAL DU PETIT-TRAVERS 2.4.1. Description 2.4.2. Dynamique de l'évolution littorale	33 33 36
3.	. Modèles semi-empiriques et validation	41
	3.1. METHODOLOGIE3.1.1. Modèles retenus3.1.2. Obtention des paramètres de calcul	41 42 43
	 3.2. VALIDATION DE LA METHODOLOGIE 3.2.1. Port Barcarès	44 45 46 47
4.	Application du modèle sur les sites-pilotes	51
	4.1. SCENARIOS ET PARAMETRES RETENUS	51
	 4.2. RESULTATS SUR LES SITES-PILOTES	51 52 53
	4.2.4.Petit-Travers	53 57

5.	Discussion sur l'évolution à long-terme des morphologies côtières	59
	5.1. ROLE DE LA MORPHOLOGIE SOUS-MARINE	59
	5.2. ROLE DES OUVRAGES	61
	5.3. ROLE DES TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE	61
	5.4. SYNTHESE ET LIMITE D'UTILISATION	65
6.	Conclusion	67
7.	Références	69

Liste des illustrations

Illustration 1 – Processus de développment d'un système côtier en fonction de la pente de substrats (modifié, d'après Tortora et al., 2001)	11
Illustration 2 - Caractéristiques générales des sites-pilotes	13
Illustration 3 - Carte de synthèse du littoral du Languedoc-Roussillon : cellules sédimentaires, dérive littorale et typologie des barres d'avant-côte (d'après Masson et al., 2002 ; Certain, 2002 ; et Sabatier et al., 2004 ; in Brunel, 2010). Les points rouges indiquent la localisation des sites retenus dans cette étude : Leucate, Gruissan, Sète et le Petit Travers.	14
Illustration 4 - Littoral de Leucate, position du profil BT080940 suivi par le SMNLR (source : Scan25, IGN)	15
Illustration 5 - Photographie oblique du littoral de Port-Leucate, vue vers le Sud-Ouest – Les digues portuaires interrompent la dérive littorale Sud-Nord, ce qui génère une accrétion marquée sur la rive sud, et une érosion sur la rive nord, qui a du être aménagée par une digue frontale et un épi supplémentaire pour essayer de gérer cette érosion (crédit photographique : EID, 26/08/2005).	16
Illustration 6 - Profil topo-bathymétrique SMNLR BT080940 au niveau de Leucate – période de mesure 1988-2001 (13 ans).	17
Illustration 7 - Evolution de l'avant-côte au niveau de Leucate : de 1895 à 1984 (en haut) et de 1984 à 2009 (en bas), d'après Brunel et al. (2012)	19
Illustration 8 – Profil sismique acquis à Leucate-plage mettant en évidence le substratum et le toit du disponible sédimentaire (d'après Ferrer, 2010)	20
Illustration 9 - Photographie oblique du littoral de Gruissan à Narbonne plage, vue vers le Nord-Est. Au premier plan, la zone aménagée des chalets de Gruissant et le grau de l'étang du Grazel, plus loin l'étang du Mateille et son grau (crédit photographique : EID, 26/08/2005).	21
Illustration 10 - Modèle topo-bathymétrique du littoral de Gruissan (Source DREAL LR), morphologies sous-marines et positionnement du profil BT114580 du SMNLR, fond Scan25, IGN.	22

Illustration 11 - Profil topo-bathymétrique SMNLR BT114580 au niveau de Gruissan – Période de mesure 1988-2001 (13 ans).	23
Illustration 12 - Evolution de l'avant-côte au niveau de Gruissan : de 1895 à 1984 (en haut) et de 1984 à 2009 (en bas), d'après Brunel et al.(2012)	25
Illustration 13 - Photographie oblique du Lido de Sète à Marseillan, le Mont-Sain-Clair en arrière-plan (EID, 25/08/2005)	26
Illustration 14 - Modèle topo-bathymétrique du littoral de Sète (Donnée DREAL LR), morphologies sous-marines et positionnement des profils de plage suivis par le SMNLR sur ce site, fond Scan25, IGN	28
Illustration 15 - Profils topo-bathymétriques SMNLR BT0166740 et BT116700 au niveau de Sète – Période de mesure 1984-2002 (18 ans)	29
Illustration 16 - Profils topo-bathymétriques SMNLR BT1665390 (1996-2002, 6 ans) et BT163490 (1984-2002, 18 ans) au niveau de Sète	30
Illustration 17 - Profils topo-bathymétriques SMNLR BT0161990 au niveau de Sète – Période de mesure 1986-2002 (16 ans).	31
Illustration 18 - Evolution de l'avant-côte au niveau de Sète : de1895 à 1984 (en haut) et de 1984 à 2009 (en bas), d'après Brunel et al. (2012)	32
Illustration 19 – Profil sismique montrant le disponible sédimentaire sableux sur la partie Sud (à gauche) et Nord (à droite) du Lido de Sète (modifié, d'après Certain, 2002).	33
Illustration 20 - Photographie oblique du lido du Petit Travers, vue vers le Nord, au contact entre les batteries d'épis et le secteur non aménagé (EID, 25/08/2005). On note le décrochement du trait de côte en aval-dérive (ici Ouest-Est) au niveau du dernier épi	34
Illustration 21 - Modèle topo-bathymétrique du littoral de Carnon-Petitt Travers (Source DREAL LR), morphologies sous-marines et positionnement des profils de plage suivis par le SMNLR, fond Scan25, IGN.	35
Illustration 22 - Profils topo-bathymétriques SMNLR BT204935 (1984-2002,18 ans) et BT207905 (1997-2002, 5 ans) au niveau du littoral du Petit Travers	37
Illustration 23 - Evolution de l'avant-côte au niveau de Carnon : de 1895 à 1984 (en haut) et de 1984 à 2009 (en bas), d'après Brunel et al. (2012)	38
Illustration 24 - Schéma conceptuel de modification d'un profil de plage avec la remontée du niveau de la mer (modifié d'après Healy, 1996). NM1 : Niveau marin initial, NM2 : Niveau marin final ; a : amplitude de l'élévation du niveau de la mer ; Alpha : pente de l'avant-côte, h : profondeur de fermeture ; l : longueur du profil actif ; s : recul du trait de côte et D : hauteur du cordon	41
Illustration 25 - Modèles semi-empiriques utilisés dans ce projet et paramètres nécessaires à leur application	42
Illustration 26 - Exemple de l'utilisation de DSAS.	43
Illustration 27 - a) Caractéristiques morphologiques des profils de validation de Port Barcarès b) Localisation des différents profils ; c) Histogrammes comparatifs des différents modèles.	45
Illustration 28 - a) Caractéristiques morphologiques des profils de validation de Canet b) Localisation des différents profils ; c) Histogrammes comparatifs des différents modèles	46

Illustration 29 - Evolution du trait de côte après +1 m d'élévation de la mer et pour trois tendances historiques sur Port-Barcarès4	48
llustration 30 - Evolution du trait de côte après +1 m d'élévation de la mer et pour trois tendances historiques sur Canet-en-Roussillon	50
Illustration 31 - Cartographie des résultats de l'application du modèle à échéance 2100 pour les trois scénarios sur le secteur de Port-Leucate, fond Scan25 IGN.	52
Illustration 32 - Cartographie des résultats de l'application du modèle à échéance 2100 pour les trois scénarios sur le secteur de Gruissan, fond Scan25 IGN	54
Illustration 33 - Cartographie des résultats de l'application du modèle à échéance 2100 pour les trois scénarios sur le secteur de Sète, fond Scan 25 IGN	56
Illustration 34 – Cartographie des résultats à échéance 2100 en prenant en compte les aménagements récents mis en œuvre sur la partie nord-est du Lido, fond Scan25 IGN5	57
Illustration 35 - Cartographie des résultats de l'application du modèle à échéance 2100 pour les trois scénarios sur le secteur du Petit-Travers, fond Scan 25 IGN.	58
Illustration 36 - Tableau de synthèse des résultats pour les quatre sites pilotes6	60
Illustration 37 - Profil de plage mesuré en 1948 sur la plage de Les Karantes à Narbonne-Plage (King & Williams, 1949)6	61
Illustration 38 - Evolution future du littoral au niveau de Leucate. Comparaison entre la projection des tendances historiques (Sogreah, 2011) et les modèles semi-empiriques (cette étude), fond Scan25 IGN6	62
Illustration 39 - Evolution future du littoral au niveau de Gruissan. Comparaison entre la projection des tendances historiques (Sogreah, 2011) et les modèles semi-empiriques (cette étude), fond Scan25 IGN6	63
Illustration 40 - Evolution future du littoral au niveau de Sète. Comparaison entre la projection des tendances historiques (Sogreah, 2011) et les modèles semi-empiriques (cette étude), fond Scan25 IGN6	64
Illustration 41 - Evolution future du littoral au niveau du Petit-Travers. Comparaison entre la projection des tendances historiques (Sogreah, 2011) et les modèles semi- empiriques (cette étude), fond Scan25 IGN6	64

1. Introduction

La prévision du devenir à long-terme du trait de côte et des morphologies littorales reste un des enjeux majeurs de la recherche en géomorphologie littorale, en raison de ses implications en termes de planification territoriale, et ceci d'autant plus dans un contexte de remontée globale du niveau marin.

De manière qualitative, les principes contrôlant l'évolution morphologiques des littoraux sur des pas de temps longs (échelle de temps géologiques) sont relativement bien identifiés et paramétrés dans des modèles conceptuels. Un exemple est présenté sur l'Illustration 1, qui montre les comportements différents d'un prisme sédimentaire côtier en fonction du taux de remontée du niveau marin et du volume sédimentaire disponible et les résultats en termes de potentiel d'érosion/préservation des masses sédimentaires sur la plate-forme.

En revanche, pour appréhender cette évolution de manière quantitative, et ceci en l'absence de modèles déterministes robustes sur ces échelles de temps, les méthodologies traditionnellement employées en ingénierie côtière font appel à différentes formules empiriques, comme l'extrapolation des tendances historiques mesurées sur une période passée, et des modèles semi-empiriques, basés essentiellement sur la règle de Brüun (1962). Ces modèles reposent sur deux concepts d'ingénierie :

- L'existence d'une profondeur de fermeture, c'est-à-dire une profondeur au-delà de laquelle les évolutions morphologiques sont nulles ;
- L'existence d'un profil d'équilibre, c'est-à-dire un profil de la plage et l'avant-côte en équilibre avec les conditions météo-marines du site.

L'objectif de la présente étude est de proposer une méthodologie pertinente d'utilisation de ces modèles semi-empiriques pour évaluer leur efficacité et leur intérêt sur le littoral du Languedoc-Roussillon en termes de capacités de prévision de l'évolution à long terme du littoral régional.

Réalisé dans le cadre des « Etudes stratégiques et prospectives sur l'évolution des risques littoraux » du volet « Gérer durablement le Littoral » du Contrat de Projet Etat-Région, ce projet, cofinancé par la Région Languedoc-Roussillon, l'Etat et la dotation de Service Public du BRGM, concerne la tâche 2 de l'action 5 du Module « Développement et partage de la connaissance ».

La tâche 1 de cette action a consisté en une revue bibliographique des modèles d'évolution à long terme des morphologies littorales et a conduit à la sélection de formulations pour leur application sur le littoral régional (Augeard *et al.*, 2011).

La présente étude vise à identifier des caractéristiques particulières de l'évolution à long terme des trois grands types morphologiques des plages du Golfe du Lion, à

travers quatre sites pilotes qui sont considérés comme représentatifs de cette typologie régionale définie par Durand (1999) :

- Leucate, pour le type « Roussillonnais » qui s'étend d'Argeles-sur-mer au Cap de leucate ;
- Gruissan pour le type « Narbonnais » entre le Cap Leucate et Saint-Pierre-sur mer ;
- Sète et Carnon Petit-Travers pour le type « Sétois », qui s'étend du Cap d'Agde à la pointe de l'Espiguette.

De plus, les modèles semi-empiriques d'évolution du littoral sont particulièrement intéressants dans la mesure où ils prennent en compte un paramètre de vitesse d'élévation du niveau marin, et permettent ainsi de mesurer les impacts sur le trait de côte de différentes vitesses de remontée du niveau d'action des vagues. Le trait de côte utilisé dans cette étude est l'interface terre-mer, indicateur couramment utilisé en Méditerranée en l'absence de marée.

Le rapport s'organise de la façon suivante :

- Une première partie est consacrée à la synthèse des différentes caractéristiques des quatre sites pilotes en termes de morphologie aèrienne et sous-marine, de contexte hydrosédimentaire, et de tendance d'évolution historique. Ce travail permet de quantifier aussi précisement que possible les différents paramètres nécéssaires aux simulations.
- Une seconde partie rappelle les principes des modèles semi-empiriques employés et détaille la méthologie mise en œuvre en comparant les différentes formulations et leur applicabilité sur le littoral régional à travers une phase de validation réalisée sur les secteurs de Port-Barcares et de Canet-en-Roussillon.
- L'application du modèle de la règle de Brünn corrigée des tendances historiques sur les quatre sites pilotes fait l'objet de la troisième partie. Les cartographies de la position possible du trait de côte à échéance 2100 pour trois scénarios de vitesse de remontée du niveau marin y sont produites et discutées pour faire ressortir la sensibilité de chacun des sites aux différents paramètres qui contrôlent l'évolution à long-terme.
- Enfin, une synthèse des résultats fait l'objet d'une quatrième partie qui permet une discussion sur le rôle respectif des différents paramètres qui contrôlent l'évolution à à long-terme du littoral du Languedoc-Rousillon, à travers ses grands types morphologiques régionaux.



Illustration 1 – Processus de développment d'un système côtier en fonction de la pente de substrats (modifié, d'après Tortora et al., 2001).

2. Les sites retenus et leur évolution historique

Afin d'évaluer les différents modes d'évolution long-terme des morphologies côtières le long du littoral du Languedoc-Roussillon, quatre secteurs correspondant aux grands types morphologiques du Littoral du Golfe du Lion ont été retenus (illustration 3):

- le littoral de Leucate ;
- le littoral de Gruissan ;
- le littoral du lido de Sète à Marseillan ;
- le littoral du Petit-Travers sur la commune de Mauguio-Carnon.

Ces secteurs ont été identifiés et définis comme site-pilotes, en raison de la diversité des différents paramètres suivants :

- le contexte géomorphologique : lido naturel ou artificialisé avec ou sans développement dunaire important ;
- la typologie de la morphologie sous-marine : profil à barre simple, double, ou multibares, barres linéaires ou en croissant ;
- le contexte hydrosédimentaire, en particulier l'alimentation par la dérive littorale résiduelle annuelle ;
- et enfin, l'évolution historique et récente du littoral, dont la cinématique du trait de côte.

Le tableau suivant rassemble ces différents paramètres (Illustration 2).

Site	Contexte géomorphologique	Morphologie sous-marine	Contexte hydro-sédimentaire
Leucate	Lido naturel	Double barres festonnées stables	Lido alimenté par dérive littorale Sud-Nord
Gruissan	Dune naturelle	Double barres très stables	Zone de convergence de la dérive littorale
Sète	Lido très aménagé avec dune artificielle stabilisée	Double-barres très évolutives	Lido homogène en sous-alimentation liée au Mont-Saint-Clair
Carnon-Petit Travers	Lido aménagé avec des batteries d'épis	Une ou deux barres stables	Lido alimenté par dérive littorale Ouest-Est

Illustration 2 - Caractéristiques générales des sites-pilotes

Ces sites sont considérés comme représentatifs des grands types de plage qui se succèdent le long du Languedoc-Roussillon, selon Brunel (2010, Illustration 3) :

- Leucate, pour le type « Roussillonnais » d'Argeles-sur-mer au Cap de Leucate, avec des plages relativement étroites composées de sables moyens à grossiers,

présentant un profil sous-marin à deux barres festonnées et un domaine dunaire peu développé ;

- Gruissan pour le type « Narbonnais » entre le Cap Leucate et Saint-Pierre-sur mer, avec des plages plutôt larges et constituées de sables fins à moyens, présentant par endroits des constructions dunaires développées et des systèmes de barres sous-marines internes linéaires et externes festonnées ;
- Sète et Carnon Petit-Travers pour le type « Sétois », qui s'étend du Cap d'Agde à la pointe de l'Espiguette, représentatifs de plages de sables fins le long d'un lido fortement aménagé, avec une dune peu développée, une plage émergée assez étroite, et des barres sous-marines le plus souvent rectilignes.

Brunel (2010) identifie également un type de plage spécifique entre Saint-Pierre et le Cap d'Agde, qui est un secteur en érosion historique chronique, avec des plages étroites, et deux à trois barres sous-marines, dont la plus externe est rectiligne par rapport aux barres internes plutôt caractérisées par une forme en croissant. Ce type de plage n'a pas été pas retenu dans le cadre de ce travail, en raison de son caractère secondaire par rapport aux grands types précédemment décrits.



Illustration 3 - Carte de synthèse du littoral du Languedoc-Roussillon : cellules sédimentaires, dérive littorale et typologie des barres d'avant-côte (d'après Masson et al., 2002 ; Certain, 2002 ; et Sabatier et al., 2004 ; in Brunel, 2010). Les points rouges indiquent la localisation des sites retenus dans cette étude : Leucate, Gruissan, Sète et le Petit Travers.

2.1. LE LITTORAL DE LEUCATE

2.1.1. Description

Le site pilote est situé sur le littoral du Roussillon, globalement orienté Nord-Sud, au droit de l'étang de Salses-Leucate. Le secteur considéré dans ce travail concerne un linéaire côtier d'environ 6 km depuis 4 km au sud de Port Leucate jusqu'à 2 km au nord de l'embouchure du grau de Leucate (Illustration 4).



Illustration 4 - Littoral de Leucate, position du profil BT080940 suivi par le SMNLR (source : Scan25, IGN)

Le linéaire côtier est constitué d'un lido sableux naturel avec un cordon dunaire peu élevé, assez urbanisé dans sa partie sud et incorpore les infrastructures portuaires de Port-Leucate dont les digues interrompent le transit sédimentaire longitudinal (Illustration 5).

La dérive littorale résiduelle annuelle, de l'ordre de 10 000 à 40 000 m³/an, (Masson *et al.*, 2002, in Brunel, 2010), est localement dirigée du Sud vers le Nord ce qui se traduit par un déséquilibre sédimentaire de part et d'autre des structures portuaires.



Illustration 5 - Photographie oblique du littoral de Port-Leucate, vue vers le Sud-Ouest – Les digues portuaires interrompent la dérive littorale Sud-Nord, ce qui génère une accrétion marquée sur la rive sud, et une érosion sur la rive nord, qui a du être aménagée par une digue frontale et un épi supplémentaire pour essayer de gérer cette érosion (crédit photographique : *EID*, 26/08/2005).

Les morphologies sous-marines sont ici caractérisées par des profils de plage fréquemment marqués par deux barres sableuses longitudinales festonnées, et reconnus comme la typologie caractéristique du littoral roussillonnais (Certain, 2002).

Le profil BT080940 régulièrement mesuré entre 1988 et 2001 par le SMNLR (Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon) montre la variabilité interannuelle de ces systèmes avec (Illustration 6) :

- une barre interne d'amplitude métrique, dont la position est très variable au cours du temps (crête entre -1.5 et -3 m NGF et entre 100 et 250 m de l'origine du profil) ;

 une barre externe, de plus grand volume, d'ampleur plurimétrique (crête entre -4 et-6 m NGF et entre 300 à 500 de l'origine du profil, qui montre ici une tendance historique à la dégénérescence, qui se traduit par un aplanissment général et une migration vers la large de la crête, et un aprofondissement.

A moyen et long-terme, ces sytèmes sont toutefois reconnus comme relativement stables, en raison de la pérénité des morphologies sur plusieurs décennies (Certain, 2002; Brunel, 2010; Ferrer, 2010). Ces systèmes de barres connaissent des évolutions saisonnières et des cycles de migration vers le large qui affectent l'évolution rapide lors des tempêtes, mais ne semblent pas jouer un rôle majeur sur la position du trait de côte qui ne présente pas de cyclicité comparable.



Illustration 6 - Profil topo-bathymétrique SMNLR BT080940 au niveau de Leucate – période de mesure 1988-2001 (13 ans).

2.1.2. Dynamique de l'évolution littorale

Ce secteur est dans une tendance d'évolution à moyen (pluriannuel) et long terme (siècle) caractérisée par une accrétion générale en raison de sa position en aval de la dérive résiduelle qui alimente le littoral en matériaux sableux depuis le Sud. Les diverses interruptions du transit par les infrastructures portuaires perturbent régulièrement cette dynamique naturelle.

En effet, l'analyse de l'évolution du littoral sur la période 1895-1984 (90 ans), réalisé par Brunel (2010), montre des résultats concordants entre les comparaisons des levés bathymétriques et de la position du trait de côte. Ainsi, le secteur au Sud du Port est en forte accrétion (environ +1 300 000 m³) conjointement avec une forte avancée du trait

de côte d'une amplitude moyenne de +37 m (+70 m au maximum), soit un taux moyen de +0,3 m/an. Le littoral au Nord est lui en érosion chronique (-1 800 000 m³) avec un recul moyen du trait de côte de -41 m (-120 m au maximum), soit un taux moyen de -0,4 m/an.

L'Illustration 7 montre une actualisation de ce travail et son extension jusqu'en 2009, sur la base d'une comparaison des données bathymétriques du SHOM de 1895 et 1984 et des données lidar acquises en 2009 par la DREAL LR (Brunel *et al.*, 2012).



Illustration 7 - Evolution de l'avant-côte au niveau de Leucate : de 1895 à 1984 (en haut) et de 1984 à 2009 (en bas), d'après Brunel et al. (2012).

Cette mise à jour montre que la majorité des évolutions se concentrent sur la période 1895-1984, avec des volumes d'accrétion et d'érosion très significatifs de part et d'autre des ouvrages, avec un facteur de 40 à 60 entre l'évolution observée et

l'incertitude de mesures. Sur la période plus récente 1984-2009, l'évolution est significative seulement le long du linéaire en érosion en aval (au nord) de Port-Leucate (facteur 10 entre l'évolution observée et l'incertitude de mesures).

Les profils sismiques par sondeur de sédiments réalisés dans ce secteur (Ferrer, 2010) mettent en évidence un disponible sédimentaire relativement important, avec des épaisseurs du stock sableux atteignant près de 4 m dans la zone des barres d'avantcôte, interne et externe (Illustration 8).



Illustration 8 – Profil sismique acquis à Leucate-plage mettant en évidence le substratum et le toit du disponible sédimentaire (d'après Ferrer, 2010).

2.2. LE LITTORAL DE GRUISSAN

2.2.1. Description

Le site pilote retenu sur ce littoral s'étend de Gruissan-plage jusqu'à Narbonne-plage sur environ 11 kilomètres. Il englobe ainsi les digues portuaires au niveau des graus des étangs du Grazel et du Mateille au niveau des Ayguades (Illustration 9).



Illustration 9 - Photographie oblique du littoral de Gruissan à Narbonne plage, vue vers le Nord-Est. Au premier plan, la zone aménagée des chalets de Gruissant et le grau de l'étang du Grazel, plus loin l'étang du Mateille et son grau (crédit photographique : EID, 26/08/2005).

Ce littoral se situe au sein de la cellule hydrosédimentaire n°3, en position centrale du littoral du Golfe du Lion, entre le Cap d'Agde et Port-Leucate (Illustration 3) et à proximité de la zone de convergence de la dérive littorale à l'échelle du golfe. Le transit résiduel annuel est de l'ordre de 10 à 40 000 m³/an depuis le Nord-Est et autant depuis le Sud-Ouest (Brunel, 2010).

Cette situation dans un contexte hydrosédimentaire favorable à l'accrétion de la bande côtière, et la nature granulométrique locale (sables fins à moyens) susceptible d'être mobilisée par les vents marins, ont, à l'échelle de temps de la transgression holocène, favorisé le développement de cordons dunaires au niveau des lidos. Ceux-ci délimitent les étangs de la mer, et de plages relativement larges, comme au niveau des chalets de Gruissan (Illustration 9).

Les morphologies sous-marines caractéristiques du littoral narbonnais, sont ici caractérisées par des profils de plage composés de deux à trois barres. Certain (2002) retient une morphologie typique avec une barre interne en croissant, une barre externe linéaire et une barre intermédiaire qui présente régulièrement une forme festonnée. Le modèle numérique de terrain réalisé en 2009 par la DREAL LR, visible sur l'Illustration 10 montre la variation longitudinale des morphologies, avec en particulier, la quasidisparition de la barre externe au droit des chalets de Gruissan (au Sud), alors qu'elle est bien formée après le passage du grau du Grazel, plus au Nord.



Illustration 10 - Modèle topo-bathymétrique du littoral de Gruissan (Source DREAL LR), morphologies sous-marines et positionnement du profil BT114580 du SMNLR, fond Scan25, IGN.

La variabilité temporelle de la morphologie du profil transversal est illustrée sur le BT114580 surveillé entre 1988 et 2001 par le SMNLR (Illustration 11). Il montre une morphologie sous-marine typique à deux barres avec :

- une barre interne d'amplitude métrique, très mobile (crête entre -1 et -2 m NGF pouvant se déplacer sur environ 250 m dans le sens du profil), qui prend parfois une position quasi-intermédiaire, comme en 1992;
- une barre externe, de plus grand volume, particulièrement stable en termes de position de la crête sur le profil, mais avec une très forte variabilité altimétrique (variant de -2 m à - 4m).

Malgré la mobilité saisonnière et inter-annuelle assez forte de ces systèmes de barres qui passent de 2 à 3 barres, ils sont relativement stables à long-terme.



Illustration 11 - Profil topo-bathymétrique SMNLR BT114580 au niveau de Gruissan – Période de mesure 1988-2001 (13 ans).

2.2.2. Dynamique de l'évolution littorale

Ce secteur se situe à proximité de la zone de convergence des flux sédimentaires de la dérive littorale le long du Golfe du Lion et il s'inscrit dans une tendance d'évolution à moyen et long terme caractérisée par une accrétion générale. Cette tendance historique est confirmée par Brunel (2010) et Brunel *et al.* (2012) et se traduit à la fois par une avancée globale du trait de côte et un gain sédimentaire général attesté par les calculs de différentiels bathymétriques, sur la période 1895-1984. Ainsi, sur ce secteur, Brunel (2010) calcule une avancée moyenne du trait de côte de +73 m (+120 m au maximum), soit un taux moyen de +0,76 m/an, et un gain d'environ 4 500 000 m³.

En revanche, on observe sur la période 1984-2009, un total renversement de tendance de l'évolution de l'avant-côte (illustration 12, Brunel *et al.*, 2012). Ainsi, tous les différents compartiments du secteur sont en érosion sur la période récente, tant au niveau de l'avant-côte au droit du grau de Gravel qui subit un aplanissement général, que sur la partie aval vers Narbonne plage, où les réajustements de l'avant-côte montrent un fort approfondissement sur le flanc marin des barres externes. Sur le secteur amont-dérive, en situation stable sur la période 1895-1984, l'érosion s'accélère sur la période récente.



Illustration 12 - Evolution de l'avant-côte au niveau de Gruissan : de 1895 à 1984 (en haut) et de 1984 à 2009 (en bas), d'après Brunel et al.(2012).

2.3. LE LITTORAL DE SETE

2.3.1. Description

Le littoral retenu pour ce travail se situe au niveau du Lido de Sète à Marseillan, au Sud-Ouest du Mont-Saint-Clair (Illustration 13). Ce secteur a été étudié à de nombreuses reprises, essentiellement pour la caractérisation de la mobilité des barres sous-marines à court et moyen terme, à des échelles de temps journalières à annuelles (Akouango, 1994 ; Certain, 2002 ; Gervais, 2012).

Ce secteur fait partie de la cellule hydro sédimentaire n°5 du Golfe du Lion qui s'étend entre le Cap D'Agde et Frontignan (Illustration 3). Le transit résiduel annuel est dirigé du Nord-Est vers le Sud-Ouest, à des taux estimés entre 10 000 et 100 000 m³/an (LNH, 1984, 1997 ; *in* Brunel, 2010).

La tendance évolutive à long terme du lido est marquée par une érosion chronique du trait de côte et des plages, en particulier dans la zone de transition entre les plages et littoral rocheux du Mont-Saint-Clair au nord, entre la pointe du Lazaret et la plage de la Corniche, qui a fait l'objet de lourds travaux de défense contre la mer (Illustration 14).

Cette tendance érosive se prolonge vers le Sud en direction de Marseillan, avec de nombreux impacts des tempêtes sur la dune et la route bordière qui ont conduit les gestionnaires (Collectivités et Etat) à relocaliser cette dernière sur une zone en arrièrelido.



Illustration 13 - Photographie oblique du Lido de Sète à Marseillan, le Mont-Sain-Clair en arrière-plan (EID, 25/08/2005)

Le type morphologique des plages correspond au type « Sétois » (Brunel, 2010) qui caractérise des plages de sables fins à moyens, étroites avec un cordon dunaire peu développé et des barres sous-marines, interne et externe, plutôt rectilignes, bien que les barres internes puissent parfois présenter des morphologies en croissant. Ces systèmes, et leur dynamique à court et moyen terme, ont été étudiés en détail par Gervais (2012).

Dans une perspective d'étude à long terme, les levés réalisés par le SMNLR le long de plusieurs profils permettent d'appréhender le degré de mobilité et de pérennité de ces systèmes (Illustration 14). L'évolution altimétrique le long des cinq profils sur le secteur d'étude est représentée du Nord-Est vers le Sud-Ouest (Illustration 15, Illustration 16 et Illustration 17).

Ces profils montrent tous un recul du trait de côte (ici la cote 0 m NGF/ING69) sur la période de mesure, ce qui confirme le caractère chronique de la tendance érosive de cette portion du littoral. Ils montrent également la grande variabilité des réponses morphologiques des barres aux forçages hydrodynamiques (tempêtes) au cours de cette période, en laissant toutefois apparaître une morphologie modale à 2 barres, interne et externe, sur l'ensemble des profils, dont les positions sont assez stables dans le temps.

Enfin, dans les fonds de 6 à 8 m, on observe un profil très plat du revers marin de la barre externe, très peu évolutif par rapport aux incertitudes de mesure bathymétrique. Il correspond à un niveau de substrat induré et donc à une limite externe du disponible sédimentaire qui est en fort déficit sur ce secteur (Certain, 2002).



Illustration 14 - Modèle topo-bathymétrique du littoral de Sète (Donnée DREAL LR), morphologies sous-marines et positionnement des profils de plage suivis par le SMNLR sur ce site, fond Scan25, IGN.



Illustration 15 - Profils topo-bathymétriques SMNLR BT0166740 et BT116700 au niveau de Sète – Période de mesure 1984-2002 (18 ans)



Illustration 16 - Profils topo-bathymétriques SMNLR BT1665390 (1996-2002, 6 ans) et BT163490 (1984-2002, 18 ans) au niveau de Sète



Illustration 17 - Profils topo-bathymétriques SMNLR BT0161990 au niveau de Sète – Période de mesure 1986-2002 (16 ans).

2.3.2. Dynamique de l'évolution littorale

Le secteur d'étude se situe en aval du Mont-Saint-Clair par rapport à la dérive littorale dominante, orientée ici NE-SW. Il subit ainsi un déficit d'alimentation sédimentaire, les apports étant bloqués en amont pour partie par le cap rocheux et les structures portuaires du port de Sète.

L'érosion chronique est ici la tendance évolutive dominante à moyen et long terme. Brunel (2010) estime que l'avant-côte du littoral depuis Marseillan jusqu'au Sud de Sète a subi une perte de -11 400 000 m³ entre 1895 et 1984. Le recul du trait de côte entre 1895 et 1989 est lui de l'ordre de -30 m en moyenne (-80 m au maximum) ; soit un taux moyen de l'ordre de -0.3 m/an.

La sectorisation de l'évolution bathymétrique de l'avant-côte entre 1895 et 1984 et entre 1984 et 2009 est représentée sur l'Illustration 18. Elle montre que le bilan sédimentaire sur la première période est positif au sud du lido du cap d'Agde à Marseillan, alors que l'érosion est dominante vers le Nord et Sète. Par la suite, cette tendance s'inverse, se caractérisant par une érosion sur l'ensemble du littoral, avec cependant une diminution de son intensité, du Nord vers le Sud.

Cette dynamique évolutive se traduit dans la répartition des masses sédimentaires le long du lido. Ainsi, au début des années 2000, des travaux d'estimation du « disponible sédimentaire » sur ce secteur ont été réalisés par sismique réflexion (Certain, 2002).



Illustration 18 - Evolution de l'avant-côte au niveau de Sète : de1895 à 1984 (en haut) et de 1984 à 2009 (en bas), d'après Brunel et al. (2012).

L'Illustration 19 montre un exemple de résultat sur deux profils terre-mer situés au Sud et au Nord du lido de Sète. Les épaisseurs sédimentaires sont ainsi très contrastées.

Au Sud, la nappe sableuse (USU en jaune) est continue depuis la ligne de rivage jusqu'au flanc marin au niveau de la barre externe, où se situe la plus forte épaisseur sableuse (4 ms temps double, soit environ 3.2 à 3.6 m). Sur la partie nord en déficit sédimentaire, les masses sableuses, sont concentrées sur la barre interne et sur la barre avec des épaisseurs maximales de 2 ms temps d soit 1.6 à 1.8 m. Le disponible sédimentaire est ici discontinu et résiduel, avec une fosse de lévigation entre la barre interne et externe, caractérisée par un substrat induré (*beachrock*).



Illustration 19 – Profil sismique montrant le disponible sédimentaire sableux sur la partie Sud (à gauche) et Nord (à droite) du Lido de Sète (modifié, d'après Certain, 2002).

2.4. LE LITTORAL DU PETIT-TRAVERS

2.4.1. Description

Le secteur d'étude retenu sur le littoral du Petit travers se situe sur le lido naturel qui s'étend de Palavas-les-Flots à la Grande-Motte et délimite l'étang de Mauguio. C'est un lido artificialisé et très aménagé. Il se concentre notamment sur une zone de transition entre un linéaire occupé par une batterie d'épis qui ont pour objectif de protéger le trait de côte au niveau d'une zone pavillonnaire dense installée en sommet de cordon, et une zone plus naturelle avec un cordon dunaire accolé à la route bordière (Illustration 20).



Illustration 20 - Photographie oblique du lido du Petit Travers, vue vers le Nord, au contact entre les batteries d'épis et le secteur non aménagé (EID, 25/08/2005). On note le décrochement du trait de côte en aval-dérive (ici Ouest-Est) au niveau du dernier épi.

Ce secteur se situe au sein de la cellule hydro-sédimentaire 6 du Golfe du Lion selon Brunel (2010, cf. Illustration 3). Elle est principalement caractérisée par une dérive littorale résiduelle annuelle dirigée depuis Frontignan, vers le Nord-Est et le Golfe d'Aigues-Mortes. Son volume est estimé de l'ordre de 10 000 à 40 000 m³/an (EID, SMNLR, 2005), et elle participe au comblement du golfe d'Aigues-Mortes. L'ensemble sud-est de cette cellule est affecté par une érosion générale, en raison de la perte sédimentaire par la dérive littorale, qui n'est que peu atténuée par les aménagements des épis mis en place entre Frontignan, Palavas et Carnon (Samat, 2007).

Conformément à la typologie « Sétoise », la plage est ici caractérisée par des sables fins à moyens, une faible largeur et des cordons dunaires peu développés. Sur le proche avant-côte, les barres sous-marines sont plutôt rectilignes et leur nombre varie de un à deux. La barre externe s'individualise particulièrement dans une position plus au large après la zone des épis (Illustration 21).


Illustration 21 - Modèle topo-bathymétrique du littoral de Carnon-Petitt Travers (Source DREAL LR), morphologies sous-marines et positionnement des profils de plage suivis par le SMNLR, fond Scan25, IGN.

La variabilité temporelle de la morphologie de la plage est illustrée via les différents levés mesurés par le SMNLR sur les profils positionnés sur le secteur d'étude et présentés depuis le Sud-Est vers le Nord-Est (Illustration 22).

Sur le profil BT204935, sur la commune de Mauguio, on observe une fréquence des profils à deux barres, en dehors de la période 1992-1994, où le profil est lissé. La barre interne se situe aux alentours de 200 m de l'origine du profil, à une amplitude inférieure à 1 m et montre une tendance à la migration vers le large entre 1998 et 2002 (50 m,

position à 250 m en 2002). La barre externe oscille entre 300-350 m de l'origine du profil, avec une amplitude métrique. Elle reste dans une position stable, à l'exception de la période 1992-1994 où le profil complet est totalement lissé. On observe un retour de la morphologie de barre en 1998, et une tendance marquée à la décroissance et à la migration vers le large.

Plus à l'Est, sur le profil BT207905, sur la commune de la Grande-Motte, la morphologie est différente avec un profil de plage présentant une barre d'amplitude métrique, située aux alentours de 250 à 300 m de l'origine du profil. Cette barre montre une tendance assez marquée à la migration vers le large et à la dégénérescence sur la période de mesures.

2.4.2. Dynamique de l'évolution littorale

Le secteur d'étude se situe sur une zone de transit de la dérive littorale, du Sud-Ouest au Nord-Est, au centre de la cellule sédimentaire. L'ensemble des flux sédimentaires résiduels se dirige vers le fond du Golfe d'Aigues-Mortes, et la tendance historique est clairement à l'érosion chronique.

De plus, la zone étudiée se situe à une transition entre un linéaire côtier aménagé d'épis, avec un transit sédimentaire ralenti et bloqué pour partie, et une zone naturelle où la dérive littorale s'amplifie, entretenant un point de fragilité vis-à-vis du recul du trait de côte.

A l'échelle du littoral de Carnon, Brunel (2010) estime que l'avant-côte est en érosion de l'ordre de -700 000 m³ entre 1895 et 1984, avec un trait de côte plutôt stable entre 1895 et 1989 (variations de +/- 10 m). Plus vers l'Est, dans le sens de la dérive, au niveau du secteur Grande Motte-Espiguette, le bilan sédimentaire est nettement positif sur l'avant-côte (+12 000 000 m³) et sur le trait de côte.

Cette tendance évolutive se confirme entre 1984 et 2009 (Brunel *et al.*, 2012 ; Illustration 23), avec la poursuite d'une érosion entre Palavas et Petit-Travers. Celle-ci disparait au droit de la grande Motte, où les fonds sont stables. Par contre sur le fond du Golfe d'Aigues-Mortes, une légère érosion, en comparaison avec la très forte accrétion sur le XX^{ème} siècle, caractérise la période récente.



Illustration 22 - Profils topo-bathymétriques SMNLR BT204935 (1984-2002,18 ans) et BT207905 (1997-2002, 5 ans) au niveau du littoral du Petit Travers.



Illustration 23 - Evolution de l'avant-côte au niveau de Carnon : de 1895 à 1984 (en haut) et de 1984 à 2009 (en bas), d'après Brunel et al. (2012).

Evolution à long-terme des morphologies côtières

3. Modèles semi-empiriques et validation

3.1. METHODOLOGIE

L'évolution future des morphologies côtières est un phénomène particulièrement difficile à appréhender. Elle résulte en effet de l'interaction de multiples facteurs naturels et anthropiques dont la responsabilité respective dans l'évolution globale est difficilement quantifiable.

Il existe à l'heure actuelle de nombreux modèles et méthodes pour estimer cette évolution à plus ou moins long terme. Ces modèles ont des caractéristiques et des finalités différentes. Ils peuvent être classés en trois groupes :

- Les modèles de processus et les modèles comportementaux ;
- Les modèles statistiques ;
- Les approches qualitatives.

Ces méthodes ont été décrites lors de la phase 1 de l'étude (Augeard et al., 2011).

Les approches de modélisation reposent toutes sur des concepts d'ingénierie tels que l'existence d'un profil d'équilibre de l'avant-côte et de la profondeur de fermeture. Leur complexité réside dans la prise en compte ou non de facteurs d'évolution locaux tels que l'existence d'une dérive littorale, de la disponibilité sédimentaire, de l'altitude ou du relief des morphologies côtières. Quelle que soit la complexité du modèle, l'évolution liée à l'élévation du niveau de la mer est une translation vers les terres du profil côtier dont l'amplitude varie selon ces facteurs locaux (Illustration 24).



Illustration 24 - Schéma conceptuel de modification d'un profil de plage avec la remontée du niveau de la mer (modifié d'après Healy, 1996). NM1 : Niveau marin initial, NM2 : Niveau marin final ; a : amplitude de l'élévation du niveau de la mer ; Alpha : pente de l'avant-côte, h : profondeur de fermeture ; l : longueur du profil actif ; s : recul du trait de côte et D : hauteur du cordon.

3.1.1. Modèles retenus

Dans un objectif d'évaluation des évolutions à long-terme en prenant en compte les scénarios d'élévation du niveau de la mer, des modèles analogiques sont utilisés pour calculer l'évolution du trait de côte. Ces modèles sont issus du principe général énoncé par Brüun (1962). Il s'agit toutefois de formulations modifiées permettant de palier aux nombreuses limites inhérentes à la Loi de Brüun.

Les cinq modèles retenus ainsi que les différents paramètres nécessaires à l'étude sont regroupés dans l'Illustration 25. Ces modèles ont été appliqués sur des profils espacés de 50 m sur les différents sites retenus.

Modèles utilisés	Données nécessaires	
La loi de Brüun $R = S * \left[\frac{L}{(B+h)}\right] = S * \left(\frac{1}{\tan \alpha}\right)$	R = recul du trait de côte (m/an); S = élévation du niveau marin (m/an); L = longueur du profil actif (m) ;	
La loi de Kriebel et Dean (1985) $R = S * \left(L/h + B \right) + \left[\frac{(Q * p/100)}{(h+B)} \right]$	h = profondeur de fermeture (m); = hauteur de la plage émergée, y compris l'avant dune (m) ; a = gain ou pertes de sédiments m3 le long du profil actif pour une période de temps donnée ; p = pourcentage de matériel sableux. L* = longueur du profil actif (m) ; W* = largeur de l'arrière-dune (m) ; h* = hauteur du profil actif depuis le	
La loi généralisé e de Dean et Mauremeyer (1983) $R = \frac{[S*(L_*+W_*)]}{(h_*-h_l)}$		
La loi de Brüun couplée au recul historique $R_{futur} = R_{historique} + (s_{futur} - s_{historique}) * \frac{L_*}{(B + h_*)}$	sommet de la plage émergée jusqu'à la profondeur de fermeture (m); hl = hauteur du cordon dunaire (m). S _{histo} = élévation passée du niveau marin	
La loi de l'inondation passive $R = \frac{L}{B+h}$	(m/an); R _{histo} = tendance historiques en m/an	

Illustration 25 - Modèles semi-empiriques utilisés dans ce projet et paramètres nécessaires à leur application.

L'objectif de cette approche est de calculer, pour des environnements variés présents le long du Golfe du Lion, la position future de la ligne de rivage, de manière à identifier les effets locaux dans les évolutions prédites et de dégager les grands scénarios d'évolution du littoral.

3.1.2. Obtention des paramètres de calcul

Les différentes données nécessaires à l'application des modèles sont dérivées de la morphologie du littoral, de son évolution telle qu'elle est décrite dans la littérature, et des différents scénarios d'élévation du niveau de la mer attendue.

a) Paramètres morphologiques

Comme indiqué dans le tableau de l'Illustration 25, plusieurs descripteurs de la morphologie littorale sont requis pour l'application des modèles. Il s'agit des paramètres physiques tels que la hauteur du cordon dunaire, la largeur de l'arrièredune, ou des descripteurs conceptuels telle que la profondeur de fermeture.

Les paramètres physiques sont mesurés grâce au levé Lidar topo-bathymétrique réalisé en 2009 (DREAL LR). Le Modèle Numérique de Terrain (MNT) permet en effet d'extraire le long du littoral la hauteur des morphologies, la largeur de plage, la largeur de l'arrière-dune... La profondeur de fermeture (H) utilisée est celle calculée par Durand (1999). Il a utilisé la technique de l'écart-type sur des profils couvrant le Languedoc-Roussillon d'Argelès-sur-Mer à Sète. La longueur du profil actif (L) est obtenue en calculant la distance entre la profondeur de fermeture et la position de la crête de dune.

b) Tendances historiques de l'évolution du trait de côte

Les tendances historiques sont obtenues grâce à l'outil DSAS (Digital Shoreline Analysis System de l'USGS ; Thieler *et al.*, 2009) compatible avec ArcGis (®ESRI). Cet outil créé des transects transversaux à partir d'une ligne de base, parallèle à la côte, définie manuellement dans l'arrière-plage (Illustration 26).



Illustration 26 - Exemple de l'utilisation de DSAS.

Les transects sont ainsi définis à intervalle régulier le long de la côte (ici tous les 50 m). Le déplacement du trait de côte est alors calculé pour chaque transect, à l'aide de différentes méthodes de calcul permettant de prendre en compte l'évolution globale du trait de côte, mais également les variabilités temporelles de cette évolution. Les taux calculés sont évidemment fortement dépendant des périodes traitées, et un test de sensibilité a été réalisé afin de choisir les traits de côte historique les plus pertinents.

Les traits de côte utilisés proviennent de la digitalisation de l'interface terre/mer sur les photographies aériennes par la DREAL-LR.

c) Paramètres sédimentaires

Le bilan sédimentaire (gain ou perte en m³) pour chaque portion du littoral du Languedoc-Roussillon, a été évalué par Brunel (2010). Il applique des techniques de calcul de différentiel bathymétrique à long terme entre les MNT de 1895 et 1984, issus de la digitalisation de cartes marines du SHOM. Ce travail a été actualisé pour la période 1984-2009, par comparaison des cartes bathymétriques du SHOM avec les données lidar de DREAL LR.

Cela permet ainsi d'obtenir le volume de sédiment accumulé ou érodé sur une cellule donnée. Le bilan sédimentaire (gain ou perte) le long du profil (Q), est obtenu par le rapport entre le bilan évalué par Brunel (2010) et la longueur du linéaire côtier de la cellule.

d) Scénarios d'élévation du niveau de la mer

Pour l'évolution à échéance 2100, trois scénarios ont été utilisés. Ils correspondent aux scénarios optimiste, pessimiste et extrême préconisés dans le rapport de la DGEC/ ONERC¹ (2010), suite au 4^{ème} rapport du GIEC (2007), soit +40 cm, +60 cm et +1m respectivement.

3.2. VALIDATION DE LA METHODOLOGIE

Afin d'évaluer la robustesse de la méthodologie et les incertitudes associées, une validation a été réalisée sur deux sites, le littoral de Port-Barcarès et le littoral de Canet-en-Roussillon. Elle avait pour objectif d'évaluer les capacités des modèles sélectionnés à reproduire les évolutions du trait de côte observées au cours du dernier siècle.

Le calcul de la tendance naturelle de recul du trait de côte résulte d'une régression linéaire des traits de côte de 1942 à 2010 sur trois profils transversaux pour chaque site.

¹ Direction Générale à l'Energie et au Climat/ Observatoire National des effets du Réchauffement climatique.

3.2.1. Port Barcarès

La localisation des trois profils utilisés pour la validation du site de Port Barcarès est observable sur l'Illustration 27 :

- Le profil 36 est situé au Nord de la zone dans un milieu urbain ;
- le profil 72 se trouve dans une zone semi-naturelle ;
- le profil 95 est localisé à proximité d'ouvrages de défense contre la mer.

La géométrie des profils est sensiblement la même pour les trois et les paramètres utilisés sont indiqués sur Illustration 27.

Les profils sélectionnés sont en érosion plus ou moins marquée de -0,5 m/an au profil 95 à plus de -2 m/an au profil 36. Le faible taux d'érosion au profil 95 est surement dû à l'existence de brise-lames et aux rechargements de plage effectués dans cette zone.

L'application des cinq modèles sur les différents profils donne des résultats assez variables. Le taux de recul calculé s'échelonne de +0.1 à -2 m/an. L'élévation du niveau de la mer sur la période considérée reste faible et les modèles privilégiant l'inondation passive ou l'influence prédominante de la variation de niveau marin donnent des évolutions très faibles, voire nulle pour l'inondation passive, par rapport à la réalité.

Si la loi de Brüun généralisée donne des ordres de grandeur des évolutions relativement correcte pour le profil 95, seule la loi modifiée prenant en compte le recul historique pour prendre en compte l'évolution historique reproduit les évolutions réellement observées de 1942 à 2010.



Illustration 27 - a) Caractéristiques morphologiques des profils de validation de Port Barcarès b) Localisation des différents profils ; c) Histogrammes comparatifs des différents modèles.

3.2.2. Etang de Canet

Tout comme sur la zone d'étude de Port Barcarès, la validation des modèles a été effectuée sur trois profils dont les caractéristiques et la position sur la zone d'étude sont exposées sur Illustration 28a et b.

Pour prendre en compte l'effet du grau, le profil 50 se situe au Sud de l'embouchure tandis que les profils 18 et 8 se trouvent du côté nord.



Illustration 28 - a) Caractéristiques morphologiques des profils de validation de Canet b) Localisation des différents profils ; c) Histogrammes comparatifs des différents modèles

La géométrie générale de la zone d'étude est caractérisée par :

- une hauteur de dune déterminée à 3 m ;
- une profondeur de fermeture (observée sur les profils bathymétriques) placée à -8 m;
- une pente moyenne du profil actif de la zone de 1,6%.

Les résultats de cette validation sont observables sur l'histogramme de Illustration 28c. Le profil au Sud du grau est caractérisé par une avancée de plus de +1 m/an. Le profil 8 aussi est en avancée de +0,33 m/an. Tandis que le profil 18 est soumis à l'action du grau et est marqué par un recul de -0,35 m/an.

De même que pour Port-Barcarès, le résultat des simulations montre clairement que la méthode des tendances historiques couplée avec la loi de Brüun représente le mieux l'évolution naturelle :

- La méthode de l'inondation n'est également pas adéquate comme le montre les très faibles valeurs prévues par la méthode. Ceci peut s'expliquer par le fait qu'elle ne prend pas en compte la dynamique littorale, seule l'augmentation de la mer est prise en compte.
- Les méthodes de Brüun simple et généralisée prévoient de l'érosion pour tous les profils. Or, deux d'entre eux ont une évolution naturelle qui tend vers l'accrétion. Les lois de Brüun ne prenant pas en compte la variation de budget sédimentaire, elles ne sont donc pas adéquates pour cette zone.

La méthode des tendances historiques couplée avec celle de Brüun est ici la plus adaptée. En effet, les tendances historiques permettent de prendre en compte les effets de site de la zone (transit sédimentaire, apport des fleuves, granulométrie...). Par conséquent c'est cette méthode qui sera appliquée dans la suite de l'étude.

3.2.3. Evaluation des tendances d'évolution historique

Afin d'évaluer les erreurs induites par le choix des données historiques, les simulations d'un niveau s'élevant d'un mètre ont été réalisées à partir de la méthode de Brüun couplée aux tendances historiques, en utilisant comme référence les périodes historiques suivantes :

- 1942-2010;
- 1992**-**2010 ;
- et 1850-2010.

a) Port-Barcarès

L'Illustration 29 rassemble les résultats des simulations sous forme cartographique.

Dans le secteur situé juste au Nord du grau de Saint Ange, les prévisions sont similaires (-20 m) quelle que soit la référence historique utilisée.

Plus au Nord, en revanche, on observe un recul plus prononcé qui varie fortement selon la référence utilisée :

- faible recul pour la période 1850-2010 ;
- recul fort pour la période 1942-2010 ;
- et recul très fort pour la période 1992-2010.

Le fort recul obtenu en utilisant la période 1992-2010 résulte des aménagements réalisés qui ont engendré des variations fortes de la position du trait de côte ces dernières années. Cette évolution privilégie donc les effets d'ouvrages récents par rapport à la tendance naturelle d'évolution du site.

La tendance obtenue avec la période 1942-2010 est plus réaliste car elle prend à la fois en compte les évolutions naturelles du site et les effets de l'urbanisation. Elle semble donc plus adaptée pour calculer des évolutions futures.

La période 1850 à 2010 induit quant à elle un recul très limité dans ce secteur pourtant perturbé, ce qui est peut-être dû aux apports de la crue de 1940 qui ont considérablement modifié les évaluations de variations du trait de côte.



Illustration 29 - Evolution du trait de côte après +1 m d'élévation de la mer et pour trois tendances historiques sur Port-Barcarès.

b) Etang de Canet

L'Illustration 29 rassemble les résultats des simulations sous forme cartographique. La modélisation à partir des tendances historiques sur les périodes 1942-2010 et 1992-2010 montre un engraissement au Sud de la digue portuaire, ce qui va dans la logique d'un transit sédimentaire dirigé vers le Nord.

Cette tendance est confirmée par les données historiques (Brunel, 2010). Toutefois, au Nord du grau, le modèle ne prévoit pas la même évolution selon la période historique considérée. En effet, avec la période 1942-2010 prise comme référence, on obtient un recul prononcé du trait de côte au nord du port. Alors, qu'en utilisant la période 1992-2010, le modèle prédit une avancée du trait de côte qui semble en désaccord avec l'observation de Durand (1999) qui montrent que depuis 1960 la tendance chronique de ce secteur est plutôt érosive.

Ces résultats tendent à montrer qu'afin de s'affranchir des évolutions rapides liées aux tempêtes ou aux aménagements, la période historique à prendre en compte pour les prévisions doit être la plus longue possible.

Le trait de côte de 1850 présentant une fiabilité limitée et n'étant pas disponible sur tout le littoral, c'est donc la période 1942-2010 qui doit être privilégiée pour calculer les tendances historiques.



llustration 30 - Evolution du trait de côte après +1 m d'élévation de la mer et pour trois tendances historiques sur Canet-en-Roussillon.

4. Application du modèle sur les sites-pilotes

4.1. SCENARIOS ET PARAMETRES RETENUS

Afin de simuler les évolutions attendues à l'échéance 2100, les scénarios d'élévation du niveau de la mer suggérés par la DGCE/ONERC (2010) ont été retenus :

- +40 cm pour le scénario optimiste ;
- +60 cm pour le scénario pessimiste ;
- +1 m pour le scénario extrême.

Les paramètres morphologiques et les évolutions historiques sur la période 1942-2010 ont été évalués sur les quatre sites pilotes retenus à l'aide de profils transverses réalisés tous les 50 m, tel que précédemment décrit dans la méthodologie et testé sur deux sites.

La principale limite de la méthode étant l'hypothèse d'un bilan sédimentaire stable, les vitesses d'évolution historiques utilisées sont calculées sur les périodes postaménagements. On vérifie ainsi l'hypothèse d'un bilan sédimentaire globalement inchangé.

De manière à évaluer les effets locaux des différents sites, l'hypothèse de préservation des conditions d'évolution est faite. Les ouvrages ou aménagements ayant contribué aux évolutions passées sont donc considérés stables et maintenus à l'échéance 2100.

4.2. RESULTATS SUR LES SITES-PILOTES

Les parties suivantes présentent les résultats bruts de la modélisation réalisée au niveau de profils espacés tous les 50 m sur les sites-pilotes. Pour chacun des sites, les calculs de positions du trait de côte en 2100 selon les trois scénarios d'élévation du niveau de la mer sont présentés.

Il faut cependant noter que la variabilité de l'évolution passée et de la morphologie le long du littoral peut entrainer des variations assez contrastées d'un profil à l'autre, qui ne reflètent probablement pas l'évolution locale réelle à l'échelle de plusieurs décennies.

De plus, le choix a été fait de ne pas lisser le trait de côte calculé, et de laisser les sinuosités marquées. Ce n'est bien sûr pas représentatif de la réalité d'un tracé du littoral en raison du processus naturel de régularisation des côtes basses d'accumulation.

Toutefois, les tendances d'évolution calculées sur les différents secteurs restent utiles pour élaborer le schéma conceptuel de fonctionnement de ces sites face à une remontée plus ou moins forte du niveau de la mer.

4.2.1. Leucate

Les résultats des calculs sur le littoral de Leucate sont reportés sur l'Illustration 31. Ils présentent, selon les modélisations, des évolutions fortes qui restent très fortement liées aux interruptions du transport littoral par les ouvrages portuaires.

Le taux d'élévation du niveau de la mer n'entraine pas de modification sensible de la localisation des zones en recul, mais il montre l'accélération du phénomène. Ainsi, le scénario extrême présente un recul supérieur d'environ 40 m par rapport au scénario optimiste.



Illustration 31 - Cartographie des résultats de l'application du modèle à échéance 2100 pour les trois scénarios sur le secteur de Port-Leucate, fond Scan25 IGN.

En aval-transit des ouvrages de Port-Leucate et du grau de Leucate au nord, l'érosion constatée ces dernières années se poursuivrait. Le recul y serait très important quel que soit le scénario retenu, et entrainerait la translation du lido vers l'étang, voire la disparition de la plage et localement la rupture du lido au nord du port conchylicole. Dans ce secteur, le recul en 2100 serait de l'ordre de 250 à 300 m.

Entre le Grau de Leucate et le port, le recul serait plus modéré, mais les différents scénarios aboutissent tous à une disparition de la plage et un recul important au niveau des villages naturistes.

Le recul au sud du Port, qui bénéficie aujourd'hui de la dérive littorale, serait beaucoup plus faible. Une avancée du trait de côte assez importante est prédite localement au sud de la jetée sud. Mais à l'exception de secteurs fortement exposés, le recul y serait inférieur à la largeur de plage actuelle.

Il apparait que sur le site de Leucate, les paramètres les plus importants contrôlant l'extension du recul sont :

- l'impact des ouvrages transversaux sur la dynamique littorale qui contrôle les tendances historiques de l'évolution littorale ;
- la morphologie du cordon dunaire : en effet, dans des zones au recul constant, les évolutions sont différentes en fonction des profils car l'amplitude du recul est modulée par la crête dunaire, les reculs les plus importants se produisant au niveau des échancrures dans le cordon qui sont aujourd'hui des zones de déflation éolienne, et qui, si elles sont situées aux endroits les plus étroits du cordon, constituent des zones privilégiées de rupture et de formation de brèches.

A l'inverse, le taux d'évolution du niveau marin selon les trois scénarios n'impacte que peu les résultats du calcul. L'importance de ce facteur, obtenu par comparaison entre les 3 scénarios, représente entre 13 à 15% du recul global (40 m par rapport à 250 à 300 m de recul global).

4.2.2. Gruissan

Sur le site de Gruissan, les évolutions historiques du trait de côte sont relativement faibles, du fait de la convergence des dérives littorales en provenance du Sud et du Nord-Est. C'est plutôt un secteur à considérer dans un contexte de stabilité à long terme voire d'accrétion globale (Brunel, 2010).

L'Illustration 32 rassemble les résultats des calculs de la position future des traits de côte pour le site de Gruissan.

Au sud dans le secteur des chalets, le recul serait très important, de l'ordre de 100 à 200 m selon les scénarios retenus, avec une contribution de 50% du paramètre variation d'élévation du niveau marin sur les reculs globaux constatés. Toutefois, la plage étant large dans ce secteur, le recul calculé n'atteint le secteur des chalets que dans le cas du scénario le plus extrême.



Illustration 32 - Cartographie des résultats de l'application du modèle à échéance 2100 pour les trois scénarios sur le secteur de Gruissan, fond Scan25 IGN.

Dans le secteur des Ayguades, le recul resterait d'ampleur modérée, mais il entrainerait néanmoins localement la disparition partielle à totale de la plage.

Au Nord, on note un recul plus prononcé, de 300 à 400 m selon les scénarios (différence de 30% en fonction du scénario de remontée du niveau marin), puis une diminution du recul sur le front de mer de Narbonne-plage qui resterait fortement touchée dans sa partie sud.

Sur cette zone d'une part, la situation en aval-transit des jetées du grau des Ayguades aggrave le recul par rapports aux secteurs adjacents, et d'autre part, le choix du scénario du taux de remontée du niveau de la mer représente une augmentation de 25% du recul entre les scénarios optimiste et extrême.

On observe également que le cordon, plutôt bien alimenté actuellement, n'est pas soumis à un risque de rupture, et que les évolutions de part et d'autre des ouvrages ne sont pas très éloignées en termes de tendance, à contrario avec le site précédent de Leucate. En effet, le contexte hydrosédimentaire est favorable, et le disponible sédimentaire plutôt abondant. C'est le paramètre de variation de remontée du niveau de la mer qui joue un rôle plus important sur les évolutions calculées à l'échéance 2100, avec une contribution d'environ 25 à 50%.

Ces évolutions sont toutefois modulées longitudinalement par des seuils morphologiques au niveau des cordons dunaires, qui conditionnent l'ampleur du recul et sa variabilité longitudinale.

Mais à l'inverse de Leucate, les différences exprimées entre les différents scénarios sont faibles sur ce littoral au bilan sédimentaire stable voire positif.

4.2.3. Sète

Les calculs réalisés sur le site de Sète ne prennent pas en compte les modifications importantes de la partie nord de la plage du Lido (rechargement de la plage, mise en place d'un atténuateur de houle, ...). Les résultats dans ce secteur sont essentiellement influencés par le recul historique très important et dépendent fortement des différents scénarios de remontée du niveau de la mer.

Les résultats des calculs de position du trait de côte futurs sont reportés sur l'Illustration 33. Ils mettent en évidence un fort recul de la partie nord du site, sujette d'ores et déjà, à l'érosion de sa plage et de son avant-côte depuis de nombreuses décennies.

Les reculs calculés seraient très importants en pouvant atteindre 500 m dans le secteur le plus sensible, au niveau de la plage de la Corniche. Ces vitesses de recul sont toutefois cohérentes avec les variations de position du trait de côte au cours du XX^{ème} siècle. Vers le Sud-Ouest, le recul s'atténuerait pour devenir nul au niveau des trois digues et faible à modéré au-delà vers Marseillan.

La vitesse de remontée du niveau de la mer ne modifie pas la répartition spatiale des zones en érosion forte, modérée ou faible. Toutefois on note, par rapport au scénario optimiste, une augmentation moyenne du recul de l'ordre de 22 m pour le scénario pessimiste et de 50 m pour le scénario extrême, soit une contribution du facteur remontée du niveau de la mer sur le recul global de l'ordre de 5 à 10%.

Ce site est typique d'un lido en érosion chronique, résultante d'un blocage en amont de l'alimentation sédimentaire par la dérive littorale et avec un disponible sédimentaire limité, voire quasi inexistant sur la partie nord au contact du massif rocheux du Mont-Saint-Clair. Les taux d'érosion historique y sont les plus importants et décroissent progressivement vers Marseillan.

Au niveau de la zone basse de Villeroy, où le cordon n'est pourtant pas le plus étroit, il se produirait un décrochage important du trait de côte pour tous les scénarios de

remontée. La contribution du paramètre relatif aux taux d'érosion historique est ici prépondérante sur les autres paramètres d'autant plus que le disponible sédimentaire est limité, et qu'il n'y a quasiment pas d'apports sédimentaires naturels dans le système.

Malgré la forte variabilité latérale des barres sous-marines, leur présence est pérenne, et les pentes des plages homogènes sur le site. La relation entre la position des barres et l'évolution du trait de côte est relativement claire à l'échelle évènementielle (Gervais, 2012), mais elle ne l'est pas sur l'évolution long-terme.

Enfin, ce linéaire est très artificialisé et le cordon dunaire stabilisé par une route bordière et une voie ferrée, qui aurait tendance à fixer le trait de côte lors d'un recul, qui ne pourrait pas se faire en « roll-over », avec translation générale du profil de plage vers la terre et conservation de sa morphologie.



Illustration 33 - Cartographie des résultats de l'application du modèle à échéance 2100 pour les trois scénarios sur le secteur de Sète, fond Scan 25 IGN.

Afin d'évaluer les modifications induites par les travaux d'aménagements récemment mis en œuvre sur le lido de Sète (Atténuateur de houle en géotextile, système de drainage ©Ecoplage), une simulation spécifique a été réalisée (cf. ill. 34). Elle repose sur une hypothèse d'atténuation du taux de recul historique du trait de côte. On considère ici que les reculs historiques de 3 à 4 m/an dans la partie nord-est du Lido vont être diminués par les protections et atteindront des valeurs de 1 m/an. Le retour

d'expérience sur ces aménagements est encore trop limité pour confirmer ou infirmer cette hypothèse qui reste malgré tout plus en accord avec l'évolution actuelle du site.

Le recul de la position du trait de côte est plus modéré et atteint la position de la nouvelle route que dans le cas extrême d'une remontée de 10 mm/an. Ces reculs ne prennent pas en compte les rechargements qui sont prévus en 2014 sur ce secteur.



Illustration 34 – Cartographie des résultats à échéance 2100 en prenant en compte les aménagements récents mis en œuvre sur la partie nord-est du Lido, fond Scan25 IGN.

4.2.4. Petit-Travers

Sur le site du Petit-travers, l'évolution historique est importante et fortement contrôlée par les ouvrages de défense de la station de Carnon-Plage. L'évolution calculée avec les différents scénarios est donc fortement contrôlée par la stabilisation de la plage au niveau de la station.

Sur le secteur à épis, les calculs prédisent un recul faible, de l'ordre de 30 à 40 m selon les scénarios (Illustration 35), soit une contribution de 30% du facteur vitesse de variation du niveau marin sur le recul global. Ces prévisions restent toutefois basées sur une hypothèse de maintien, d'entretien et d'efficacité des ouvrages jusqu'en 2100.

Dans la partie naturelle du Petit-Travers, qui a souffert d'érosion importante ces dernières décennies en partie à cause des ouvrages protégeant le front de mer, le recul y serait modéré, de l'ordre de 40 à 100 m selon les scénarios, (soit 50 à 60% de contribution du paramètre vitesse d'élévation du niveau marin). Pour le scénario extrême, le recul serait ainsi deux fois plus important. Vers l'Est, ce recul s'atténuerait légèrement car ce secteur bénéficie à nouveau d'une partie de la dérive littorale résiduelle Ouest-Est.



Illustration 35 - Cartographie des résultats de l'application du modèle à échéance 2100 pour les trois scénarios sur le secteur du Petit-Travers, fond Scan 25 IGN.

Sur le secteur du Petit-Travers, qui est situé sur une zone d'accélération de la dérive littorale, entre Carnon-Plage et ses épis à l'Ouest et le lido naturel à l'Est, le paramètre taux d'érosion historique est important et mis en évidence par le décrochage du trait de côte après la zone à épis. Sur le lido naturel, l'homogénéité du cordon dunaire bien développé, et celle de la morphologie sous-marine, limite les sinuosités des traits de côte calculés, par rapport au site de Sète par exemple.

Cependant, l'évolution littorale future est ici fortement contrôlée par le choix du scénario de vitesse de remontée du niveau de la mer, qui contribue selon les secteurs entre 30 et 60% du recul global du trait de côte.

5. Discussion sur l'évolution à long-terme des morphologies côtières

Le tableau de l'illustration 36 rassemble les principaux résultats des simulations effectuées sur les quatre sites-pilotes et met en évidence les particularités de la réponse de chacun des sites aux différents paramètres d'entrée des calculs.

Ce « test de sensibilité » permet ainsi d'extraire une hiérarchie des paramètres prépondérants et secondaires, sur l'évolution future du trait de côte pour chacun des sites-pilotes.

5.1. ROLE DE LA MORPHOLOGIE SOUS-MARINE

Les levés réalisés par le SMNLR sur une vingtaine d'années montrent la grande variabilité à court et moyen-terme de la position des barres sous-marines, mais une relative stabilité des morphologies générales des profils à long-terme. Les barres sont ainsi très fréquemment présentes à des positions préférentielles sur un profil en équilibre dynamique à long terme, dont la morphologie normale ou « modale » est caractérisée par ces barres.

Les premiers relevés journaliers des profils de plage sur le Languedoc-Roussillon ont probablement été réalisés sur la plage des Karantes à Narbonne-plage en 1948 (King et Williams, 1949, Illustration 36). Ils montrent qu'à cette époque, avant aménagement du littoral, celui-ci était déjà caractérisé par des morphologies de barres sableuses très similaires à celles présentes actuellement (Illustration 37). Bien que ces corps sédimentaires sont perturbés par les effets des ouvrages installés lors de l'aménagement du littoral, les barres conservent généralement des caractéristiques propres.

Ainsi, Aleman *et al.* (2012) montrent à travers l'analyse du levé Lidar de 2009 (DREAL) que les structures portuaires interrompant la dérive littorale perturbent localement la continuité latérale des barres mais que celles-ci perdurent sur les littoraux adjacents.

Dans une perspective à long-terme, il apparait que le facteur « morphologie sousmarine », examiné par le biais de sa diversité en termes de nombre de barres et de leur position, n'a pas une influence prépondérante sur l'évolution du littoral, bien qu'elle soit une des traductions du volume sédimentaire disponible, qui s'adapte en fonction des conditions hydrodynamiques modales. Les barres jouent un rôle essentiel, mais du fait qu'elles sont pour la plupart toujours présentes dans les jeux de données historiques, elles sont considérées comme étant pérennes dans le futur

Site	Leucate	Gruissan	Sète	Carnon-Petit Travers
Contexte géomorphologique	Lido naturel Pas de cordon dunaire	Lido naturel et cordon dunaire peu développé	Lido très aménagé avec dune artificielle stabilisée	Lido aménagé avec des batteries d'épis et plage sans aménagement
Morphologie sous- marine	Double-barres festonnées stables Type Roussillonnais	Double barres très stables Type Narbonnais	Double-barres linéaire très évolutives Type Sétois	Une ou 2 barres stables Type Sétois
Contexte hydro- sédimentaire	Lido alimenté par dérive littorale Sud- Nord	Lido à la convergence des dérives littorales	Lido aménagé en sous- alimentation chronique	Lido alimenté par dérive littorale Ouest-Est, zone de transit de la dérive
Tendance évolutive historique	Erosion	Accrétion, stabilité	Erosion chronique	Erosion chronique
Disponible sédimentaire	Peu important	Important	Faible	Peu important
Evolution morphologique attendue	Recul du trait de côte au Nord et au Sud de l'ouvrage Brèche et rupture du cordon au nord	Recul du trait de côte similaire au Nord et au Sud de l"ouvrage Pas de rupture de brèche dans le cordon	Recul faible sur la partie Sud Recul fort sur la partie nord Erosion la plus forte au niveau des ouvrages de protection à la racine du lido	Stabilité relative du linéaire urbanisé au niveau de la batterie d'épis Décrochage du trait de côte sur le linéaire est en aval-dérive Fortes oscillations dues à la topographie irrégulière de la plage
Facteurs de contrôle principaux	Morphologie dunaire au nord Rupture d'alimentation de la dérive au centre de la zone	Augmentation du niveau marin Morphologie dunaire initiale homogène sur le secteur	Sous-alimentation par la dérive littorale Forts taux d'érosion historique. Morphologie basse et plane de l'arrière plage	Morphologie très hétérogène des dunes sur la zone Est en aval- dérive (siffle-vents-accès, caoudeyres, overwash de 1982)
Influence de la morphologie sous- marine sur l'évolution à long-terme	Non	Non, morphologie stable	Non, morphologie variable	Non
Influence du taux de remontée du niveau marin	Faible (13-15%)	Forte (50%)	Faible (5-10%)	Moyenne à forte (30- 60%)

Illustration 36 - Tableau de synthèse des résultats pour les quatre sites pilotes



Fig. 5. Beach profile at Les Karantes, South France

Illustration 37 - Profil de plage mesuré en 1948 sur la plage de Les Karantes à Narbonne-Plage (King & Williams, 1949)

5.2. ROLE DES OUVRAGES

Tous les sites pilotes étudiés sont caractérisés par une zone d'interruption et/ou de ralentissement de la dérive littorale du fait de la présence de : digue portuaire pour Leucate et Gruissan, Cap rocheux au Mont-Saint-Clair à Sète et zone des épis de Carnon pour Petit-Travers.

A l'exception du site de Gruissan, les résultats des simulations montrent un décrochage des traits de côte en aval dérive de ces zones aménagées, avec pour certains des reculs potentiellement générateurs de rupture des lidos (Leucate, Sète). Les reculs constatés dans ces secteurs résultent ainsi de la conjonction entre la différence des taux d'évolutions historiques sur les secteurs non aménagés et aménagés, et le degré homogénéité longitudinale des cordons dunaires sur la zone en recul.

Le rôle des ouvrages est donc fondamental dans l'évolution à long-terme du littoral, en particulier sur le littoral du Languedoc-Roussillon, dans la mesure où ils contraignent les taux d'évolution historiques.

5.3. ROLE DES TAUX D'EVOLUTION HISTORIQUE

L'actualisation de l'aléa érosion sur l'ensemble de la région Languedoc-Roussillon a été réalisée par Sogreah (2011). La position future du trait de côte a été évaluée à partir d'une hypothèse de projection des tendances d'évolution historique passée, modifiée à « dire d'expert ». Cette méthode qui s'appuie sur des observations passées ne tient pas compte des critères morphologiques et de la vitesse de remontée du niveau marin, mais elle est considérée comme intégratrice de l'ensemble des phénomènes et processus côtiers, et est employée classiquement pour l'élaboration d'aléas de référence dans les PPR Littoraux (MATE/METL, 1997).

La comparaison des résultats de cette méthode avec celle des modèles semiempiriques développée au cours de cette étude, permet de pondérer le rôle de chacun des paramètres pour chacun des sites et d'évaluer, à travers les écarts constatés, la contribution relative, pour chacun des sites, des taux d'évolution observés à l'échelle historique sur l'évolution générale du trait de côte.

Sur Leucate (Illustration 38), on observe ainsi, que les reculs attendus sont bien plus importants par rapport à ceux calculés par projection des tendances historiques. Ils mettent également en évidence des points de plus grande vulnérabilité du littoral au niveau des décrochages des traits de côte, qui traduisent des zones de faibles hauteur du cordon dunaire, en particulier (paramètres morphologiques).



Illustration 38 - Evolution future du littoral au niveau de Leucate. Comparaison entre la projection des tendances historiques (Sogreah, 2011) et les modèles semi-empiriques (cette étude), fond Scan25 IGN.

Sur Gruissan (Illustration 39), les résultats sont assez comparables entre les graus de Mateilles et Grazel, dans un secteur en contexte historique d'accrétion. Au Sud et au Nord, sur les secteurs en érosion, on retrouve des tendances similaires observées sur Leucate avec des décrochages au niveau des zones basses des cordons dunaires.



Illustration 39 - Evolution future du littoral au niveau de Gruissan. Comparaison entre la projection des tendances historiques (Sogreah, 2011) et les modèles semi-empiriques (cette étude), fond Scan25 IGN.

Les résultats pour Sète (Illustration 40) montrent des évolutions similaires entre les deux méthodes pour le sud du lido, qui est en accrétion, et un recul beaucoup plus important vers la plage de la Corniche.

Sur Petit-Travers (Illustration 41), les résultats restent à l'inverse, dans une gamme d'évolution comparables, à l'exception de l'hypothèse sans maintien des ouvrages qui indique un recul plus important sur la zone à épis, et une tendance à la régularisation locale du littoral qui s'accompagne d'une avancée du trait de côte sur la zone naturelle à l'Est.



Illustration 40 - Evolution future du littoral au niveau de Sète. Comparaison entre la projection des tendances historiques (Sogreah, 2011) et les modèles semi-empiriques (cette étude), fond Scan25 IGN.



Illustration 41 - Evolution future du littoral au niveau du Petit-Travers. Comparaison entre la projection des tendances historiques (Sogreah, 2011) et les modèles semi-empiriques (cette étude), fond Scan25 IGN.

5.4. SYNTHESE ET LIMITE D'UTILISATION

L'utilisation des formulations semi-empiriques, de type Brüun modifiée, sur les quatre sites pilotes du littoral du Languedoc-Roussillon apporte des éléments de pondération des résultats de la méthode d'évaluation de l'aléa recul du trait de côte par projection des tendances historiques, ainsi :

- Sur les différents sites, la position du trait de côte déterminée par cette dernière méthode se retrouve en situation avancée sur les secteurs en érosion chronique à l'échelle historique par rapport aux modèles semi-empiriques, alors que sur les zones en accrétion, les évolutions se situent dans des gammes comparables (Gruissan, Petit-Travers).
- Dans les contextes érosifs aggravés par les ouvrages, cette méthode rend compte d'un décrochage quasi-systématique du trait de côte en aval-dérive de ceux-ci, avec une ampleur très significative (Leucate, Sète, Gruissan).
- Cela met en lumière les points de vulnérabilité du littoral, susceptibles d'être le lieu de formation de brèches dans les cordons littoraux, s'ils sont trop étroits, alors que cette information est masquée par la méthode des tendances historiques (Sète).

La différence de recul attendu pour les scénarios optimistes et pessimistes, et d'autre part le recul global permet de déterminer la contribution du facteur vitesse de remontée du niveau de la mer pour chacun des sites-pilotes. Ainsi, les sites les plus sensibles à ce facteur sont le littoral du Narbonnais (Gruissan) et le Golfe d'Aigues Mortes (Petit-Travers). Pour ces deux sites, ce facteur compte pour 50% environ du recul global.

L'utilisation des formules semi-empiriques est cependant soumise à un certain nombre d'hypothèses et de limitations :

- Elles prennent en considération de manière simplifiée de la morphologie du littorale (crête de dune, longueur du profil actif, profondeur de fermeture), en se basant de plus sur le concept du profil d'équilibre, qui est lui aussi très critiquable (Pilkey *et al.*, 1993).
- Elles n'intègrent pas les processus sédimentaires, tels que les apports/pertes par dérive littorale, reconnus comme le principal moteur de l'évolution du trait de côte à long-terme (De Vriend *et al.*, 1993).
- Elles ne tiennent pas compte de la géologie littorale et de la proximité du substratum, et donc du volume sédimentaire disponible.
- Elles n'associent pas les futurs modes de gestion du littoral (protection, relocalisation, etc.).

 Enfin, la position calculée du trait de côte ne doit pas être considérée comme la réalité de la position du trait de côte en 2100. C'est une des multiples possibilités d'évolution, et ce d'autant plus que le phénomène naturel de régularisation des côtes basses d'accumulation aura tendance à lisser son tracé.

Malgré leurs limites, et dans une perspective de travail sur la caractérisation d'un aléa « recul du trait de côte », et de cartographie de celui-ci, la mise en œuvre de cette méthodologie, permet de donner des indications supplémentaires et pertinentes pour corriger « à dire d'expert » une cartographie initiale issue d'une simple projection mathématique des tendances historiques dans le futur, en particulier dans les zones vulnérables au recul chronique.

6. Conclusion

La prévision du devenir à long-terme du trait de côte et des morphologies littorales reste un des enjeux majeurs de la recherche en géomorphologie littorale, en raison de ses implications en termes de planification territoriale, et ceci d'autant plus dans un contexte de remontée globale du niveau marin. Pour appréhender cette évolution à long terme, et en l'absence de modèles déterministes robustes, les méthodologies traditionnellement employées en ingénierie côtière font appel à différentes formules empiriques, comme l'extrapolation des tendances historiques mesurées sur une période passée, et des modèles semi-empiriques, basés essentiellement sur la règle de Brüun.

Ces modèles sont particulièrement intéressants dans la mesure où ils prennent en compte un paramètre vitesse d'élévation du niveau marin. Ils peuvent donc être employés pour tester les impacts sur l'évolution du trait de côte de différents scénarios climatiques en termes de ralentissement, stagnation ou accélération de la remontée du niveau marin.

La présente étude avait ainsi pour objectif d'expérimenter l'utilisation de ces modèles semi-empiriques pour une estimation de l'évolution à long-terme du littoral du Languedoc-Roussillon et ainsi de tester leur intérêt par rapport à l'application d'une extrapolation des tendances de recul historique, sur un littoral particulièrement marqué par une érosion chronique des plages et du trait de côte.

Un premier test de l'ensemble des modèles semi-empiriques a été réalisé sur trois profils dans les secteurs de Port-Barcarès et de Canet en Roussillon. Il a mis en évidence que la formulation de Brüun corrigée des tendances historiques est celle qui reproduit de la manière la plus satisfaisante les évolutions constatées sur une période de simulation de 1942 à 2010. Cette formulation intègre de plus des paramètres morphologiques de l'état de la plage et du cordon dunaire.

Par la suite, l'application de cette formulation a été effectuée pour quatre sites considérés comme représentatifs des grands types morphologiques du littoral régional :

- Leucate, pour le type « Roussillonnais » d'Argeles-sur-mer au Cap de leucate, avec des plages relativement étroites composées de sables moyens à grossiers, avec un profil sous-marin à deux barres festonnées et un domaine dunaire peu développé ;
- Gruissan pour le type « Narbonnais » entre le Cap Leucate et Saint-Pierre-sur mer, avec des plages plutôt larges et constituées de sables fins à moyens, avec par endroits des constructions dunaires développées et des systèmes de barres sousmarines internes linéaires et externes festonnées ;
- Sète et Carnon Petit-Travers pour le type « Sétois », qui s'étend du Cap d'Agde à la pointe de l'Espiguette, représentatifs de plages de sables fins le long d'un lido fortement aménagé, avec une dune peu développée, une plage émergée assez étroite, et des barres sous-marines le plus souvent rectilignes.

Sur chacun de ces secteurs, les formulations sont appliquées selon des profils espacés de 50 m sur des linéaires de 4 à 15 km environ, rendant ainsi compte de la variabilité longitudinale des évolutions. La comparaison des résultats entre chacun des sites permet d'extraire une hiérarchie des paramètres principaux ou secondaires sur l'évolution future du trait de côte, et en particulier le facteur vitesse de remontée du niveau marin.

Bien que les barres sous-marines jouent un rôle essentiel dans la dynamique sédimentaire côtière, notamment par leur rôle protecteur (atténuateur de houle) et de stock sédimentaire, l'utilisation des modèles ne révèle pas d'influence évidente dans les différents scénarios projetés. En effet, ces barres sont considérées comme pérennes dans le passé et donc dans le futur également. A l'inverse de la morphologie du cordon dunaire (hauteur de la dune et largeur de la plage active), qui conditionne fortement les zones où le trait de côte est susceptible de décrocher dans le futur, en particulier au niveau des zones basses en aval des ouvrages.

Le rôle des ouvrages, prépondérant sur l'évolution historique du littoral du Languedoc-Roussillon et son érosion chronique, est lui intégré dans le paramètre taux d'évolution historique (tendances historiques).

Enfin, le ratio entre d'une part la différence de recul attendu pour les scénarios optimistes et pessimistes, et d'autre part le recul global permet de déterminer la contribution du facteur vitesse de remontée du niveau de la mer ce dernier, et donc la dépendance de chacun des secteurs. Ainsi, les sites les plus sensibles à une variation de remontée du niveau marin sont le littoral du Narbonnais (Gruissan) et le Golfe d'Aigues Mortes (Petit-Travers). Pour ces deux sites, ce facteur compte ainsi pour 50% environ du recul global.

Malgré leurs limites, qui peuvent être assez importantes comme la non-prise en compte du contexte géologique ou hydrosédimentaire (flux, et disponible sédimentaire), ces formulations semi-empiriques sont également intéressantes dans une perspective de travail sur la caractérisation d'un aléa « recul du trait de côte ». Elles donnent ainsi des indications supplémentaires et pertinentes pour corriger « à dire d'expert » une cartographie initiale issue d'une simple projection mathématique des tendances historique, en particulier dans l'identification des zones vulnérables au recul chronique, liées à des morphologies dunaires abaissées et/ou hétérogènes.

7. Références

Akouango E. (1997). Morphodynamique et dynamique sédimentaire dans le Golfe du Lio. Contribution à l'étude de la zone côtière dans l'actuel et le Quaternaire récent. Thèse de Doctorat, Univ. Perpignan, 193 p.

Aleman N., Michel C., Robin N., Certain R., et Barusseau JP. (2012). Impact des ouvrages portuaires sur la morphodynamique des barres sédimentaires d'avant-côte du Languedoc-Roussillon, pp. 159-168, DOI:10.5150/jngcgc.2012.018-A

Augeard C, Tirard E., Balouin Y., (2011) – Etat des connaissances sur les méthodologies d'évaluation de l'évolution des morphologies côtières. Rapport RP-60107-FR, 69 p.

Brunel C., (2010) – Evolution séculaire de l'avant-côte de la méditerannée française, impact de l'élévation du niveau de la mer et des tempêtes. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille I, 470 p.

Brunel C., Certain R., Alleman N., Raynal O., Barusseau JP., et Sabatier F. (2012). Atlas de l'évolution des fonds et des budgets sédimentaires séculaires de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon 1895-2009.

Brüun, **P.**, (1962) – Sea-level rise as a cause of shore erosion. Journal Waterways and Harbours Division, 88(1-3), 117-130 p.

Certain R., (2002) – Morphodynamique d'une côte sableuse microtidale à barres : le Golfe du Lion (Languedoc-Roussillon). Thèse, Université de Perpignan, 209 p.

Dean R.G., Mauremeyer E.M., (1983) – Models for beach profile responses. In: P.D. Komar (Editor), handbook of Coastal Processes and Erosion. CRC Press, Boca Raton, pp. 151-166.

DGEC/ONERC (2010). Prise en compte de l'élévation du niveau de la mer en vue de l'estimation des impacts du changement climatiques et des mesures d'adaptation possibles. Synthèse n°2, février 2010, 6 p.

de Vriend H.J., M. Capobianco, T. Chesher, H.E. de Swart, B. Latteux, M.J.F. Stive, (1993). Approaches to long-term modelling of coastal morphology : A review, Coastal Engineering, Volume 21, Issues 1–3, December 1993, Pages 225-269.

Durand P. (1999) – L'évolution des plages de l'ouest du golfe du Lion au XXème siècle. Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire, analyse prévisionnelle. Thèse de doctorat, Université lumière Lyon 2, Lyon, France, 461 p.

Ferrer P. (2010). Morphodynamique à multi-échelles du trait de côte (prisme sableux) du golfe du Lion depuis le dernier optimum climatique. Thèse de Doctorat, Univ. de Perpignan, 255 p.

Gervais M. (2012). Impacts morphologiques des surcotes et vagues de tempêtes sur le littoral méditerranéen. Thèse de Doctorat, Univ. de Perpignan, 370 p.

GIEC (2007) – Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A.]. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.

Healy, T., 1996. Sea level rise and impacts on nearshore sedimentation: an overview. Geol Rundsch 85 :546-553.

King, C.A.M. & Williams, W.W., 1949. The formation and movement of sand bars by wave action. Geografical Journal, 113, 70-85.

Masson M., Crauchet L., Sabatier F.,(2002). Evolution du littoral sableux du Golfe du Lion. Deuxième phase d'étude. Constat et perspective en vue de l'élaboration d'une stratégie de gestion. CETE Méditerranée - IPSEAU - Etude n°96-66-086, 87 p.

MATE, METL -Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement- (1997). Plan de prévention des risques littoraux (PPR). Guide méthodologique. La documentation française, Paris, 54 p.

Pilkey O.H., Young R.S., Riggs S.R., Smith A.W.S., Wu H., Pilkey W.D (1993). The Concept of Shoreface Profile of Equilibrium: A Critical Review. *Journal of Coastal Research SI* 9: 225-278.

Samat O; (2007). Efficacité et impacts des ouvrages en enrochement sur les plages microtidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône. Thèse de Doctorat, Univ. Aix-Marseille I, 304 p.

Sogreah 2011. Actualisation de l'aléa erosion en Languedoc-Roussillon. Rapport CPER2007-2013 n°1713060, 29 p et 10 annexes (147p).

Thieler, E.R. , Himmelstoss E.A., Zichichi, J.L and Ergul, A. (2009). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 – An ArcGis extension for calculating shoreline change : USGS Open file report 2008-1278 updated for version 4.2.

Tortora, P., Bellotti, P. and Valeri, P.; 2001: *Late-Pleistocene and Holocene deposition along the coasts and continental shelves of the Italian peninsula.* In: Vai G.B. and Martini I.P. (eds), Anatomy of orogen: the Apennines and Adjacent Mediterranean Basins, Kluwer Academic Publisher, pp. 455-477.


Centre scientifique et technique 3, avenue Claude-Guillemin BP 36009 45060 – Orléans Cedex 2 – France Tél. : 02 38 64 34 34 Service géologique régional "Languedoc-Rousillon" 1039, rue de Pinville 34000 – Montpellier France Tél. : 04 67 15 97 93