

Document public

Etude des phénomènes de submersion marine sur le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer

Rapport n°2

BRGM/RP-52902-FR
janvier 2004



Document public

Etude des phénomènes de submersion marine sur le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer

Rapport n°2

BRGM/RP-52902-FR
janvier 2004

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service Public du BRGM 01-LIT-216

C. OLIVEROS, A. LAMBERT
Avec la collaboration de
L. CHOPPIN, N. MARÇOT,
Y. GREGORIS (Météo France)



Mots clés : Erosion, littoral, submersion, trait de côte, risques naturels, Camargue, Saintes-Maries-de-la-mer, Salins du Midi

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

Oliveros C., Lambert A. (2004) - Etude des phénomènes de submersion marine sur le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer. BRGM/RP-52902-FR, 116 p., 37 fig., 8 tabl., 1 pl. hors texte.

© BRGM, 2004, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Cette étude s'inscrit dans le cadre du IV^{ème} Contrat de Plan Etat Région « Risques naturels et nuisances – Action Données, information, évaluation sur les risques naturels ». Elle a été réalisée en partenariat technique et financier entre le Conseil Régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, la Direction Régionale de l'Environnement (DIREN) et le BRGM.

Ce rapport prolonge celui issu de l'étude réalisée fin 2001 (Phase 1 – Etat des données existantes)

Cette étude a bénéficié de l'appui scientifique et technique du CEREGE au travers de son unité mixte de recherches associée au CNRS (UMR 6635), et de Météo France DIRSE (Direction Interrégionale Sud-Est).

Du fait de sa localisation, des phénomènes d'érosion séculaire qui affectent globalement tout le littoral et de la configuration morphologique de la frange côtière (cordon littoral de faible largeur et altitude), le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer est particulièrement exposé aux risques de submersion. Les ouvrages de protection contre l'érosion et la submersion sont nombreux, mais les risques demeurent.

Cette étude a pour objectif de localiser les secteurs sensibles aux phénomènes de submersion et d'en déterminer les causes. Elle s'est appuyée sur une étude bibliographique (rapports d'étude, données) réalisée préalablement (rapport de phase 1, BRGM/RP-51461-FR, janvier 2002).

A continuation, une recherche systématique a été menée afin d'obtenir :

- un inventaire des événements météorologiques exceptionnels (tempêtes, houles, surcotes) qui ont conduit à des situations de submersion d'origine marine ou à des endommagements d'ouvrages de défense ;
- une chronologie de l'évolution du trait de côte, et sa quantification sur l'ensemble du littoral de la commune ;
- un état des lieux de l'implantation d'ouvrages de défense (historique et actuelle) ;
- une connaissance complète des conditions hydrodynamiques.

Ce sont les données et analyses issues de cette recherche exhaustive qui sont exposées dans le présent rapport.

Par ailleurs, sont également présentées ici les volets de modélisation mis en œuvre :

- par de Météo France pour la prévision des surcotes sur le secteur de Camargue
- par nous-même pour la l'évolution morphologique d'une plage suite à une tempête

Enfin, la dernière partie de ce rapport est consacrée à l'exposé des enjeux face à la submersion tels qu'ils sont appréhendés par les principaux acteurs locaux.

Ce rapport constitue la base de l'expertise qui aboutit au rapport de synthèse BRGM/RP-52747-FR.

Sommaire

PARTIE I : Ouvrages de défense contre l'érosion marine et la submersion sur le littoral de la commune	9
1. Aménagements de deuxième ligne.....	11
2. Ouvrages de prise d'eau de la CSMSE.....	13
3. Aménagements de première ligne	15
3.1. Aménagements effectués avant 1960.....	15
3.2. Aménagements effectués entre 1960 et 1978.	15
3.3. Aménagements effectués entre 1978 et 1983.	18
3.4. Aménagements effectués entre 1984 et 1989.	20
3.5. Aménagements effectués entre 1990 et 1994.	25
3.6. Aménagements effectués entre 1995 et 1999.	27
3.7. Aménagements effectués depuis 2000.....	31
4. Aménagements de type ganivelles	33
5. Aménagements en projet.....	35
PARTIE II : Contexte hydro-climatique régional	37
1. Les niveaux de la mer.	39
1.1. La marée astronomique	39
1.2. Périodes de retour des hauteurs d'eau maximales.....	39
1.3. Etude des surcotes réelles.....	41
1.4. Surcotes exceptionnelles au cours du XX ^{ième} siècle	43
1.5. Variations long terme du niveau de la mer dans le delta du Rhône.....	44
2. Le climat de houle	47
2.1. Régime de houles aux Saintes-Maries-de-la-Mer.....	47
2.2. Régime de houles au Cap Couronne.....	47
2.3. Le régime au large	50
2.4. Propagation des houles à la côte.....	51
2.4.1. Résultats de SOGREAH.....	51
2.4.2. Résultats de Sabatier (1997).....	52
3. Régime des vents en Camargue.....	55

PARTIE III : Synthèse des évolutions du littoral	57
1. Introduction	59
2. Méthode	61
3. Evolution du trait de côte.....	63
3.1. Secteur du fond du golfe de Beauduc.....	66
3.2. Secteur de l'étang des Batayolles.....	66
3.3. Secteur de l'étang de l'Impérial.....	67
3.4. Secteur de l'agglomération des Saintes-Maries.....	68
3.5. Secteur embouchure du Petit Rhône - Quatre Maries.....	70
3.6. Secteur Quatre Maries - Clos de Brasinvert	70
3.7. Secteur Clos de Brasinvert - Rhône Vif	71
4. Synthèse des évolutions et interprétation	73
4.1. Rôle des houles	73
4.2. Impact des aménagements sur les vitesses de recul	74
4.2.1. Le littoral de l'étang dit de « L'Impérial »	75
4.2.2. L'agglomération des Saintes-Maries-de-la-Mer.....	75
4.2.3. De l'embouchure du Petit Rhône au Clos de Brasinvert	77
4.2.4. Du Clos de Brasinvert au Rhône Vif.....	77
5. Conclusion	79
PARTIE IV : Modélisations	81
1. Modélisation morphodynamique	83
1.1. Introduction	83
1.2. La méthode utilisée.....	83
1.2.1. Le logiciel SBEACH.....	83
1.2.2. Les données d'entrée.....	84
1.3. Les essais sur les profils de Rousty.....	86
1.3.1. Les données d'entrée communes à chaque essai : le profil initial et les éléments de forçage.....	86
1.3.2. Les essais et les résultats obtenus.....	88
1.3.3. Les explications possibles.....	90
1.4. Conclusion	92
1.5. Bibliographie citée.....	93
2. Modélisation des surcotes.....	95
2.1. Introduction	95
2.2. Les situations modélisées.....	95

2.3.	Mise en œuvre de la modélisation	96
2.4.	Résultats de la modélisation	96
PARTIE V : Enjeux		101
1.	La Compagnie des Salins du Midi et du Sud-Est (CSMSE).....	103
1.1.	Fonctionnement de l'exploitation des Salins d'Aigues-Mortes	103
1.2.	Le parcours de la fabrication du sel	103
1.3.	En cas de submersion marine	104
1.4.	Incidences de la stratégie de défense du littoral déployée par la CSMSE	105
2.	La commune des Saintes-Maries-de-la-mer	107
3.	Le Parc Naturel Régional de Camargue	109
3.1.	Cadre naturel	109
3.2.	La gestion de l'eau	110
3.3.	Occupation de l'espace et activités	111
3.4.	Enjeux par type de milieu ou d'activité	112
3.5.	Objectifs du contrat de delta Camargue.....	113
4.	La Réserve Naturelle de Camargue.....	115
4.1.	Problèmes rencontrés ou potentiels	115
4.2.	Les enjeux.....	115

Liste des figures

Figure II-1 : Répartition des niveaux extrêmes au Grau de la Dent par ajustement de Gumbel (1985-1993). SOGREAH, 1995	40
Figure II-2 : Surcotes et décotes maximales mensuelles entre décembre 1904 et février 1998 (Bruzzi, 1998).....	42
Figure II-3 : Caractérisation de la variabilité saisonnière des maxima mensuels. (Bruzzi 1998)	43
Figure II-4 : Périodes de retour des niveaux marins maxima en tenant compte des projections faites pour le siècle prochain. (Suanez, 1997).....	45
Figure II-5 : Régime des houles enregistrées au Cap Couronne de 1964 à 1969. (Suanez, 1997).....	47
Figure II-6 : Distribution des hauteurs significatives par directions dominantes. (Suanez, 1997).....	49
Figure II-7 : Distribution des périodes significatives par directions dominantes. (Suanez, 1997).....	49

Figure II-8 : Distribution par secteur de l'énergie des vagues au large. (SOGREAH, 1995).....	50
Figure II-9 : Variation du coefficient de réfraction du Rhône Vif à Beauduc (SOGREAH, 1995).....	52
Figure II-10 : Distribution saisonnière des directions de vent	56
Figure III-1 : Carte de Cassini (Carte levée entre 1770 et 1775 par Renault, Le Jeune, Langelay, 116 ^{ème} feuille publiée).....	59
Figure III-2 : Extrait de la Carte de Cassini (Saintes-Maries et Petit Rhône).....	60
Figure III-3 : Tendances d'évolution du littoral par secteurs.	63
Figure III-4 : Evolution de la position du trait de côte de la commune depuis 1895.....	65
Figure III-5 : Evolution du rivage du Golfe de Beauduc	66
Figure III-6 : Evolution du rivage de l'étang des Batayolles	67
Figure III-7 : Evolution du rivage l'étang dit de « L'Impérial » (Grau de la Fourcade à la limite de la Réserve Nationale de Camargue)	68
Figure III-8 : Evolution du rivage de l'agglomération des Saintes-Maries	69
Figure III-9 : Evolution du trait de côte des Saintes-Maries-de-la-Mer depuis 1895 (fond orthophoto IGN 1998).....	69
Figure III-10 : Evolution du rivage de l'Embouchure Ouest du Petit Rhône au Quatre Maries	70
Figure III-11 : Evolution du rivage du secteur des Quatre Maries au Clos de Brasinvert.....	71
Figure III-12 : Evolution du rivage du Clos de Brasinvert au Rhône Vif.....	71
Figure III-13 : Aménagements littoraux du secteur de «L'Impérial » et profils de calculs associés.	75
Figure III-14 : Aménagements littoraux de l'agglomération des saintes-Maries et profils de calculs associés.	76
Figure III-15 : Aménagements littoraux du Clos de Brasinvert à l'embouchure du Petit Rhône et profils de calculs associés.	77
Figure III-16 : Aménagements littoraux du Rhône Vif au Clos de Brasinvert et profils de calculs associés.	78
Figure IV-1 : Profils levés par le CEREGE sur la plage de Rousty les 4 et 17/10/2000.....	86
Figure IV-2 : Hauteur et période de houle obtenues à partir de la bouée du Golfe de Beauduc.....	87
Figure IV-3 : Directions de la houle obtenues à partir de la bouée du Golfe de Beauduc et du vent obtenues à la station de Port-Guardian (recalculées selon la convention SBEACH).....	87
Figure IV-4 : Vitesses du vent obtenues à la station de Port-Guardian.	88
Figure IV-5 : Comparaison des résultats avec les profils initial et mesuré in situ (essai10).	89
Figure IV-6 : Gros plan sur la berme du graphique de la figure IV-5.	90
Figure IV-7 : Surcotes observées et modélisées du 1 au 12 janvier 1994.....	97

Figure IV-8 : Surcotes observées et modélisées du 10 au 15 novembre 1996	98
Figure IV-9 : Surcotes observées et modélisées du 7 au 29 décembre 1997	98
Figure IV-10 : Surcotes observées et modélisées du 16 au 27 septembre 1999	99
Figure IV-11 : Surcotes observées et modélisées du 24 au 31 décembre 1999	99

Liste des tableaux

Tableau II-1 : périodes de retour des niveaux exceptionnels (SOGREAH, 1995)	39
Tableau II-2 : périodes de retour des niveaux exceptionnels (Suanez, 1997).....	41
Tableau II-3: Surcotes supérieures à 40 cm pendant au moins deux jours. (Bruzzi, 1998).....	44
Tableau II-4 : Périodes de retour des hauteurs de houle (SOGREAH, 1995)	51
Tableau II-5 : Coefficients de réfraction K_r par zone géographique et par secteur de houle au large. (Sabatier, 1997).....	53
Tableau II-6 : Répartition des vents de mer dominants en fonction de la vitesse.(Suanez, 1997) - nd = donnée non disponible	55
Tableau II-7 : Répartition saisonnière des vitesses du vent entre 1962 et 1994. (Suanez, 1997).....	56
Tableau III-1 : Vitesses annuelles moyennes de d'évolution du trait de côte	64

PARTIE I : OUVRAGES DE DEFENSE CONTRE L'EROSION MARINE ET LA SUBMERSION SUR LE LITTORAL DE LA COMMUNE

Cette première partie de l'étude se proposait d'établir une chronologie aussi exhaustive que possible de la mise en place des aménagements de protection du littoral contre l'érosion marine et la submersion sur le linéaire côtier de la commune des Saintes-Maries-de-la-mer.

On se référera à la planche hors texte pour la localisation des ouvrages mentionnés.

1. Aménagements de deuxième ligne

1856-57 : Construction de la Digue à la mer.

Objectifs : Située lors de sa construction à des distances importantes du rivage, elle avait comme rôle d'empêcher que la mer n'envahisse les étangs du delta par forte tempête. A certains endroits, elle est maintenant un rempart direct contre la mer (Saintes-Maries, Courbe à la Mer).

Maître d'ouvrage : Etat (1857).

Gestionnaire : Syndicat de la Digue à la Mer (devenu depuis SYMADREM).

Caractéristiques initiales : Elle fut construite en 1856-57 avec matériaux sablo-limoneux pris sur place. Elle se raccorde à l'Est à des travaux antérieurs (digues de Paulet et de la Palissade).

Etat actuel : L'ouvrage était percé par endroits de pertuis permettant un contrôle des échanges d'eau entre les étangs et la mer. Actuellement, certains de ces passages ne sont plus fonctionnels, d'autres (Fourcade, dans une moindre mesure Rousty) assurent encore ce rôle d'échange. Des travaux de réfection ont été entrepris en :

- 1972 : Réparations, point kilométrique 0,0 à 0,5.
- 1978, Réparations, point kilométrique 3,1 à 3,4.
- 1979, Réparations, point kilométrique 0,0 à 0,45 et 2,0 à 3,4.
- 1980 : Réparations, point kilométrique 2,61 à 2,8.
- 1989 : Réparations, point kilométrique 8,6 au 10,54.
- 1990 : Réparations, point kilométrique 10,94 au 12,6.
- 1992 : Réparations, point kilométrique 12,6 au phare de la Gacholle.

1971 : Reconstruction de la digue de deuxième ligne de la CSMSE.

Objectifs : Empêcher la pénétration des eaux dans l'exploitation en cas de surcote exceptionnelle.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : Cette digue existe depuis l'établissement des Salins du Midi à Aigues-Mortes. Elle s'étend du Rhône Vif à l'étang de Brasinvert (9800 m de long), à près de 1000 m à l'arrière du trait de côte.

Etat actuel : Jusqu'en 1970, elle n'est qu'en sable argileux. Sa côte d'arase est revue à la hausse (+0,9m NGF) après une tempête en 1970. Entre 1971 et 1982, la cote de couronnement est revue à +1,6m NGF. Les portions détruites par la tempête de 1982 sont reconstruites et leur cote relevée à +1,8m NGF.

1984 -1986 : Construction de la digue de 2^{ème} ligne de protection de Bois Pin Fourcat.

Objectifs : Protéger les propriétés amont de l'intrusion des eaux marines en cas de tempête et surcote exceptionnelle.

Maître d'ouvrage : CIAM (Compagnie Industrielle et Agricole du Midi - Saint-Gobain)

Maître d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : Digue en terre, d'une longueur de 2100 m, peu élevée, non destinée à lutter contre l'action des houles, mais pour empêcher les submersions lors d'événements de haut niveau marin.

Etat actuel : En partie végétalisée, elle est entretenue et sert de piste aux véhicules.

1988 : Construction d'une digue de deuxième ligne entre l'étang d'Icard et le Grand Radeau.

Objectifs : Protéger les propriétés amont de l'intrusion des eaux marines en cas de surcote exceptionnelle.

Maître d'ouvrage : CIAM

Maître d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : Digue en terre, peu élevée, de 1800 m de long, non destinée à lutter contre l'action des houles, mais contre les inondations d'origine marine.

Etat actuel : Par endroits végétalisée, elle est entretenue et sert de piste aux véhicules.

2. Ouvrages de prise d'eau de la CSMSE

1942 : Construction de la première prise d'eau n°1.

Objectifs : Alimentation en eau de mer des marais salants de la CSMSE d'Aigues-Mortes et du Grau du Roi.

Caractéristiques initiales : 5 canalisations mises en service en 1942, une sixième vers 1959. Ces canalisations, d'un diamètre intérieur de 0,8 m, sont disposées en éventail s'ouvrant vers la mer et occupant le DPM sur une surface en forme de trapèze de 70x30x40m.

Maître d'ouvrage et d'œuvre : CSMSE

Etat actuel : Cette prise d'eau n'est plus utilisée et a été remplacée par une nouvelle prise n°1.

1952 : Construction de la prise d'eau n°2.

Objectifs : Alimentation en eau de mer des marais salants , suite à un abaissement progressif de la salinité des eaux du canal d'Aigues-Mortes, qui ne permettait plus, en 1952, une saunaison normale.

Maître d'ouvrage et d'œuvre : CSMSE

Caractéristiques initiales : 5 canalisations disposées en éventail. Bouches s'ouvrant à 100m d'un môle fortifié en enrochement. Fonctionnement de 1952 à 1966.

Etat actuel : Ne fonctionne plus. Enrochements entretenus dans un but de défense du littoral.

1966 : Construction de la station de pompage en mer Paul KRAMB-Jean CLAIN (nouvelle prise n°1).

Objectifs : Alimentation en eau de mer des marais salants d'Aigues-Mortes et du Grau-du-Roi.

Maître d'ouvrage et d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : Chenal ouvert (large de 16m) depuis la station jusqu'à la mer, à travers la plage. La sortie du chenal en mer est protégée par des enrochements et deux digues parallèles agissant comme des épis. Après l'arrêt de l'alimentation en eau par la prise n°2, cette station devient la seule source d'alimentation en eau de mer des marais salants des Salins d'Aigues-Mortes.

Etat actuel : Identique à l'initial, entretien régulier ou suite à des dommages.

3. Aménagements de première ligne

3.1. AMENAGEMENTS EFFECTUES AVANT 1960

1940-50 : Construction de 4 épis transversaux, entre les Arènes et le grau de la Fourcade, secteur est des Saintes-Maries.

Objectifs : Freiner l'érosion du centre et de l'est du littoral de la ville des Saintes-Maries.

Caractéristiques initiales : 4 épis parallèles, orientés nord-sud.

Epi oriental de 100m dont 75 en mer à la construction,

- Deux épis centraux de 75m dont 50 en mer,
- Epi occidental de 50m dont 25 en mer.

Espacement des épis d'est en ouest : 150 m, 100 m et 125 m.

Etat actuel : Ces aménagements sont abandonnés, non-entretenus, enfoncés et submergés. Ils ne sont plus efficaces. L'épi occidental gît sous le petit brise-lames du Grand Large, construit en 1993 entre le Grand Epi Est (ou Epi du Grand Large, 1970) et l'épi en « T » du Grand Large (1991).

1940-50 : Construction de 5 épis transversaux au droit du centre des Saintes-Maries, au droit et à l'ouest des Arènes.

Objectifs : Freiner l'érosion du centre et de l'ouest du littoral de la ville des Saintes-Maries.

Caractéristiques initiales : 5 épis parallèles, orientés nord-sud. D'est en ouest :

- épi de 75m dont 60 en mer,
- épi de 100m dont 80 en mer,
- épi de 50m dont 25 en mer,
- et deux épis de 75m dont 25 en mer.

Espacement des épis d'est en ouest : 110 m, 150 m, 150 m et 110m.

Etat actuel : les deux derniers épis occidentaux ont été démantelés lors de la construction du port. L'épi central complété d'un tenon ouest en 1974 gît sous l'épi en « T » des Arènes construit en 1984. L'épi de 100m a été abandonné ; il est aujourd'hui enfoncé et submergé. L'épi oriental a été reconstruit en 1995 dans le cadre des travaux de protection prévus par l'étude GEOMIDI de 1982.

3.2. AMENAGEMENTS EFFECTUES ENTRE 1960 ET 1978.

1961 : Construction de 8 épis autour de la prise d'eau n°1.

Objectifs : stabiliser le littoral de la prise n°1.

Maître d'ouvrage : CSMSE.

Maître d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : 8 épis droits orientés sensiblement au sud-sud-est, sur un linéaire côtier de 400m. Trois ont été implantés à l'ouest de la prise d'eau et cinq à l'est. Ils portent les numéros 1W à 3W à l'ouest de la prise d'eau et 1E à 5 E à l'est. Ces épis n'ont pas été efficaces en raison de leur obliquité. Lors de la tempête de 1966 (houles de sud-est), ils ont été contournés par l'ouest, leur orientation accentuant l'attaque de la houle, et les terres furent inondées jusqu'au Rhône de Saint-Roman.

Etat actuel : Des épis perpendiculaires au littoral ont été rebâties en 1981 sur leur emplacement. Ils ont conservé la même numérotation : d'ouest en est 3W, 2W, 1W, 1E, 2E, 3E, 4E, 5E.

1963 : Construction d'un épi sur la prise d'eau n°2 - Digue Fesquet

Objectifs : Permettre la stabilisation du littoral dans ce secteur.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : Epi de 100m d'extension, appelé Digue FESQUET, orienté au sud-sud-est.

Etat actuel : Musoir enfoncé sur 20m.

1966 : Construction de 400 m linéaires de digue au niveau du Radeau de Deux Pins.

Objectifs : Empêcher la pénétration des eaux marines.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : Digue droite construite en lieu et place du cordon dunaire détruit.

Etat actuel : Disparue, démantelée par les tempêtes.

1967 : Construction d'un Grand Epi à l'ouest des Arènes.

Objectifs : Protection contre l'érosion du littoral ouest de la ville des Saintes-Maries.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Epi droit relié à la Digue à la Mer de 350 m de long. En 1973 il a été fait une ouverture sur près de 80 m de sorte que l'épi n'avait plus que

200 m de long à partir de la Digue à la mer ; en mer subsiste l'extrémité de l'épis, sur 70 m, coupé de sa racine. Cette ouverture a été faite afin de favoriser les transferts de sable d'ouest en est.

Etat actuel : Epi "disparu" sous la digue ouest du Port Gardian.

1970 : Construction du Grand Epi Est

Objectifs : Protection contre l'érosion du littoral de la ville des Saintes-Maries.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Epi droit relié à la côte de 260 m d'extension, dont 160 en mer à la construction. Cote d'arase +3.1 m NGF, talus 3/2. Prolongé par un tenon orienté sud-sud-est en 1971. Travaux d'entretien en 1973 et 1974. Exhaussement de l'enracinement en 1977. Rechargement de la plage attenante en 1988.

Etat actuel : Tenon et extrémité enfoncés sur 160 m, marqués par une bouée de navigation. Les 80 m suivants affleurent à la surface. Les 150 premiers mètres sont entretenus.

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

1974 : Construction de l'épi latéral de la plage Camille.

Objectifs : Ré-ensablement de la plage Camille

Caractéristiques initiales : Epi droit relié à la Digue à la Mer (frontale), orienté à l'est, perpendiculairement à la frontale.

Etat actuel : identique à l'initial

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

1976 : Construction d'une digue frontale à la prise d'eau N°1

Objectifs : Protection contre l'érosion

Caractéristiques initiales : Digue frontale de près de 300 m de long, reliant d'une part l'épi 3W à la digue rive droite du canal de pompage, et la rive gauche de celui-ci à l'épi 1E.

Etat actuel : identique à l'initial. Ouvrage haut, entretenu, très exposé aux houles. L'ouvrage assure le maintien du trait de côte artificiel sur 300 m.

Maître d'ouvrage : CSMSE.

Maître d'œuvre : CSMSE.

3.3. AMENAGEMENTS EFFECTUES ENTRE 1978 ET 1983.

1979 à 1981 : Construction de 5040 m linéaire de digue de haut de plage.

Objectifs : Colmater les brèches et renforcer le cordon dunaire.

Maître d'ouvrage : CSMSE.

Maître d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : Digue en levadon de sable et cailloutis de Crau reliant les montilles du cordon dunaire entre le Clos de la Comète (limite ouest du littoral de la commune des Saintes) et le Brasinvert. Cette digue est arasée à la cote +1,5 m NGF. Elle se situait, lors de la construction, en moyenne à 150 m de distance du rivage.

Etat actuel : Cette digue a été en partie envahie par le recul du cordon dunaire. Certaines portions détruites ont fait l'objet d'une reconstruction en enrochements en 1986 et 1988 (portions de digues frontales). D'autres portions ont été recouvertes par les dunes.

1979-1980 : Construction de la digue ouest du Grau de la Fourcade.

Objectifs : Empêcher l'ensablement du grau.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Digue en enrochements orientée S-SE, terminée par un môle,. Extension : 280 m à partir du franchissement de la Digue à la Mer du Grau de la Fourcade. Cote d'arase +1,6 m NGF ; talus 3/2. Elle est venue se substituer à une ancienne levée de 200 m de long.

Etat actuel : Fonctionnelle et entretenue. Un géotextile a été posé en 1988.

1980-1981 : « Redressement » des épis des salins de 1961.

Objectifs : Protection de l'implantation de la prise n°1.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : A l'est de la prise d'eau, épis droits en enrochement, de 65m d'extension (sauf le n°2E, 45 m), orientés N-S, bâtis en lieu et place des épis obliques de 1961. L'épi 1E a conservé la même orientation et même caractéristique qu'à l'origine (épi court de 40 m de long en mer). A l'ouest de la prise d'eau, les épis

3W et 1W ont été reconstruits, orientés N-S, d'une longueur de 40 m en mer. L'épi le plus à l'ouest (n°3W) est muni d'un petit brise-lames d'une quinzaine de mètres (épi en T). L'épi 2W n'a pas été reconstruit. Les épis 3W à 1E sont raccordés à la digue frontale construite en 1976.

Etat actuel : Les épis, bien qu'entretenus (sauf le 2W), présentent des signes de fatigue (quelques affaissements aux extrémités).

1981 (juin) : Construction de 3 épis d'essai à l'est de la prise d'eau n°2.

Objectifs : L'établissement de ces épis à l'est de la prise d'eau n°2 (littoral ouest Clos de Brasinvert) fait suite à un rapport d'étude réalisé par la société Géomer en 1980, qui démontre que l'installation d'épis courts (100 m de long) espacés de 200 m, perpendiculaires au rivage, constituerait une solution efficace et financièrement intéressante pour lutter contre le recul du littoral. Ces épis expérimentaux sont implantés par la CSMSE sur une zone particulièrement fragile de son littoral, qui connaissait des problèmes d'entrée d'eau marine par forte tempête.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : CSMSE et entreprise Crozel.

Caractéristiques initiales : Les épis réalisés ont une longueur de 75 m dont 50 en mer à la construction et sont espacés tous les 200 m. Ils sont arasés à la cote +1,5 m NGF. Les recommandations du bureau d'étude faisaient état, à longueur égale, d'un espacement de 150 m entre épis.

Etat actuel : Ces épis ont résisté à la tempête moyenne de décembre 1981, ainsi qu'à la tempête exceptionnelle de décembre 1982. Jusqu'en 1992, une stabilisation du littoral est observée. En 1998, ils sont en passe d'être contournés par la mer. Ces épis portent les numéros 19, 20 et 21. Fin 2002, l'épis n°19 est largement contourné par la mer ; les épis 20 et 21 ont été rallongés et raccordés à une digue frontale en 1998-1999.

1980-1983 : Construction des digues frontales du centre et de l'est de la ville des Saintes-Maries.

Objectifs : Protection de la ville.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Digues en enrochements.

Etat actuel : Entretien et renforcée d'ouvrages transversaux de protection. Une reprise des ouvrages en 1983 avait été nécessaire suite aux dégâts occasionnés par la tempête de décembre 1982. Cote d'arase +2,3 m NGF ; talus 5/2.

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

1982 : Construction de la digue ouest et sud - camping du Clos du Rhône.

Objectifs : Protéger l'ensemble du littoral compris entre l'embouchure du Petit Rhône et l'ouest de la ville compte tenu de la disparition progressive de la plage entre le Clos du Rhône et le Crin Blanc.

Caractéristiques initiales : Digue en enrochements. Elle est adossée à l'historique Digue à la mer.

Etat actuel : Elle a fait l'objet de reprises en 1986 et 2001-2002 (digue frontale).

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries.

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

1983 : Construction de 600 m de digue de part et d'autre de la résidence de Crin Blanc.

Objectifs : Protéger la résidence de Crin Blanc, la route et les habitations limitrophes contre les tempêtes, en raison du recul important de la plage à l'ouest du port Gardian.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Digue en enrochement. Elle repose sur la Digue à la mer.

Etat actuel : Entre le port et Crin Blanc, elle est ensablée et colonisée par la végétation. Elle n'affleure que par endroits.

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

3.4. AMENAGEMENTS EFFECTUES ENTRE 1984 ET 1989.

1984 à 1986 : Construction des épis de Petite Camargue

Objectifs : La construction de ces épis a pour objectif, suite à l'expérience des Salins, de freiner l'érosion sur le littoral de Petite Camargue.

Maître d'ouvrage : La CSMSE (30 épis, numéros 1 à 18 et 22 à 33) , la CIAM (13 épis, numéros 34 à 39 et 53 à 59) et la ville des Saintes-Maries (13 épis, numéros 40 à 52).

Maître d'ouvrage : la CSMSE (assistée de l'entreprise Crozel) pour ses épis et ceux de la CIAM ; les Services Maritimes des Bouches du Rhône sont maître d'œuvre pour les épis de la ville des Saintes-Maries.

Caractéristiques initiales : Ces épis, au nombre de 56, ont les mêmes caractéristiques que les épis test de 1981, soit d'une longueur de 75 m dont 50 en mer

à la construction et espacés tous les 200 mètres. Ils sont arasés à la cote +1,5 m NGF et le musoir reposent sur des fonds à -1,2 m NGF ; talus 4/3.

Etat actuel : Ils commencent à se déchausser dès 1989 au niveau du Grand Radeau. Ils sont rallongés vers la terre et connectés aux digues frontales existantes entre 1986 et aujourd'hui (voir détails dans la suite du texte).

Les épis concédés à la CIAM en 1984 ont été transférés à la Commune des Saintes-Maries en 1995, puis au SYMADREM en février 2001

1983-84 : Construction du port des Saintes-Maries (Port Gardian).

Objectifs :

- Faciliter le déplacement des navires entre Port Camargue et Fos-sur-Mer ce qui représente une distance de 45 milles appelée autrefois « le grand saut »,
- Offrir aux pêcheurs des Saintes-Maries un lieu de mouillage plus sûr que les berges du Petit Rhône,
- Développer le tourisme de plaisance aux Saintes-Maries.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries / S.E.M.I.S. (Société d'Economie Mixte de la ville des Saintes-Maries).

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône.

Caractéristiques initiales : Dès l'origine, le projet de port s'intègre dans le schéma d'ensemble destiné à lutter contre l'érosion marine qui affecte le littoral de la ville des Saintes-Maries. Deux jetées en enrochements s'avancent sur 250m en mer et constituent un chenal en V. Elles contribuent au blocage des transits sédimentaires. Elles créent une sorte d'avant-port qui facilite l'accès des navires. La jetée ouest se situe à l'emplacement d'un l'ancien épi (Grand Epi Ouest).

Etat actuel : Les digues du port sont surveillées et entretenues. Elles ont été reprofilées en 2000. Des dragages sont effectués tous les ans pour lutter contre l'ensablement, notamment à l'entrée et sur le chenal d'accès.

1984 : Construction de l'épis en «T» des arènes.

Objectifs : Protection du littoral de la ville des Saintes-Maries contre les impacts de tempêtes.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Brise-lames en enrochement de 190 m rattaché à la côte par un épi émergé de 120 m. Cote d'arase +2,0 m NGF ; talus 3/2.

Etat actuel : Carapace reprofilée en 1988-89. Elle présente en 2002 une altération d'une dizaine de mètres de longueur sur le segment ouest.

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

1986 : Construction de la digue est du Grau de La Fourcade.

Objectifs : Protection du grau contre l'ensablement.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : digue en enrochements, de 130 m de longueur à l'origine.

Etat actuel : La longueur de la digue a été portée à 170 m en 1989. Aménagement entretenu : dragage du chenal, pose de géotextile (1988).

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

1986 : Reconstruction de la digue sud du camping du clos du Rhône.

Objectifs : Protection du camping suite à la disparition du cordon dunaire et de l'extrémité ouest de la plage.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Digue frontale en enrochements de 200 m de long depuis la digue du Petit Rhône. Construite en appui à la Digue à la Mer.

Etat actuel : Digue entretenue. En 2002, des affaissements localisés ont été observés. Elle a été reprofilée suite aux aménagements réalisés en 2002 (épi rive gauche de l'embouchure et 1^{er} brise-lames).

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

1986 : Construction de 200 ml de digue appelée Digue « de l'Angela » (Brasinvert).

Objectifs : Ce secteur (entre les épis n° 29 et 31) a connu un recul très important au cours des trente dernières années. La tempête de 1982 a détruit le cordon dunaire et ouvert une brèche dans le littoral à cet endroit. Afin de protéger le littoral et les marais salants, la CSMSE a entrepris la construction d'une digue en haut de plage.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : Digue de haut de plage en petits enrochements et gros cailloux, construite avec une côte d'arase à +1,6 m NGF.

Etat actuel : Le sable de la plage remonte sur la digue. Elle est franchissable en cas de tempête et surcote.

1986 (avril) : Epi ouest de protection du Petit Rhône.

Objectifs : Protéger la rive droite de l'embouchure et la plage à l'ouest de l'embouchure qui connaît les plus fortes vitesses de recul au cours du XX^{ème} siècle. Resserrer l'embouchure afin de réduire les atterrissements de sédiments et ainsi de favoriser les écoulements en cas de forts débits.

Maître d'ouvrage : CIAM

Maître d'œuvre : non identifié.

Caractéristiques initiales : Epi droit en enrochement, de 180 m d'extension, orienté NO-SE. Cote d'arase +2,7 m NGF

Etat actuel : Identique à l'initial après réparations suite à quelques grosses tempêtes.

1986: Construction de 1950 ml de digue frontale à l'avant de l'étang d'Icard (ouest du Petit Rhône).

Objectifs : Protéger le littoral ouest de l'embouchure (Domaine de la CIAM) en complément aux épis construits entre 1984 et 1986 (numéros 53 à 59).

Maître d'ouvrage : CIAM.

Maître d'œuvre : CSMSE.

Caractéristiques initiales : digue en enrochements. Côte d'arase +2,2 m NGF

Etat actuel : Cette digue a souffert à de multiples occasions (tempêtes d'octobre 1993 et 5 au 6 janvier 1994). Elle a été reconstruite en 1993 à l'arrière des épis n°60-61 (construits en 1993) et connectée à la digue d'embouchure rive droite du Petit Rhône. Malgré les travaux de confortement passés, la côte d'arase est aujourd'hui de l'ordre de +1,7 m NGF.

1986 : Digue frontale du Poste de secours n°2 (la Fourcade).

Objectifs : Protection du Poste de secours contre les effets des tempêtes.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Digue en enrochements. Cote d'arase +3.2 à +3.5 m NGF ; talus 5/2.

Etat actuel : Identique à l'initial. L'ouvrage a connu d'importants désordres lors de tempêtes (1996, 1997)

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

1987 : Prolongement de la digue frontale est des Saintes-Maries jusqu'au poste de secours n°2.

Objectifs : Protection contre les effets de tempête.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Digue en enrochements de 700 m de long (sur Digue à la Mer). Cote d'arase +2,3 m NGF ; talus 5/2.

Etat actuel : Identique à l'initial. Interventions d'entretien suite à tempêtes.

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

1988 : Construction de 412 ml de digue frontale en enrochements (secteur Radeau des Deux Pins) - Digue dite de la Gracieuse.

Objectifs : Ce secteur a connu un recul très important au cours des trente dernières années. La tempête de 1982 a détruit le cordon dunaire et ouvert une brèche dans le littoral à cet endroit. Malgré la construction des épis en 1984, le secteur est toujours vulnérable à l'arrière des épis 9 et 10. Afin de protéger le littoral et les marais salants, la CSMSE a entrepris la construction de cette digue frontale.

Caractéristiques initiales : Digue en enrochements, construite en haut de plage, entre deux reliques de dunes.

Etat actuel : Conforme à l'initial.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : CSMSE.

1989-1991 : Construction de la digue frontale du Grand Radeau.

Objectifs : Ce secteur a connu un recul très important au cours des trente dernières années. Les épis implantés en 1984-86 n'ont pas été totalement efficaces et certains sont en phase d'être contournés. Devant l'urgence de la situation (terrains rongés par la mer), il est décidé d'implanter une digue frontale afin de fixer le trait de côte.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries.

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Digue en enrochements, construite en haut de plage à l'arrière des épis n° 50 à 52 en 1989 et à l'arrière des épis n°40 à 49 en 1991.

Etat actuel : Suite à des ruines partielles de l'ouvrage (tempêtes successives), la digue a été partiellement reprise (entre épis 43 à 52) à partir d'avril 2000. Elle reste très

endommagée entre les épis 40 et 43 (affaissements, passage de la mer à travers l'ouvrage) suite aux tempêtes d'octobre 1993 et du 5 au 6 janvier 1994.

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

3.5. AMENAGEMENTS EFFECTUES ENTRE 1990 ET 1994.

1990-91 : Construction de l'épis en «T» du Grand Large.

Objectifs : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte, protection de la plage est des Saintes-Maries et des résidences en amont.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Ouvrage prévu par l'étude GEOMIDI-LCHF (1982) dans le cadre de la protection du littoral de la ville des Saintes-Maries. Brise-lames en enrochement de 150m, relié à la côte (digue à la mer) par un épi perpendiculaire de 200m. Cote d'arase +2,8 m NGF ; talus 2/1

Etat actuel : Identique à l'origine (entretenu).

1991 : Construction du tenon est (épi de retour) du Grand épis est.

Objectif : protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte, protection de la plage est.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries ou S.E.M.I.S. (Société d'Economie Mixte de la ville des Saintes-Maries)

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Tenon de 70 m en enrochements, orienté O-SO – E-NE, faisant office de brise-lames. Fait partie des aménagements prévus par l'étude SOGREAH (1989) dans le cadre de la protection du littoral Est de la ville des Saintes-Maries. Cote d'arase du tenon +2,0 m NGF.

Etat actuel : Identique à l'initial.

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

1993 : Construction de la digue frontale « Pinède - Quatre-Maries ».

Objectifs : Protection contre l'érosion du secteur des Quatre-Maries.

Maître d'ouvrage : CIAM

Maître d'œuvre : CSMSE

Caractéristiques initiales : Digue frontale en enrochements d'une longueur de 400 m à l'arrière des épis n°35 à 40. Cote d'arase +2,2 m NGF.

Etat actuel : Quelques signes de submersion par-dessus l'ouvrage (entre épis 36 et 37). Digue endommagée entre les épis n°39 et 40.

1991 à 1994 : Constructions digues frontales sur le littoral de la CSMSE

Objectifs : Protection contre l'érosion et la submersion sur les secteurs de la prise d'eau n°1, de l'ancienne prise d'eau n°2 et du Clos de Brasinvert.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : CSMSE / Entreprise Crozel

Caractéristiques initiales :

1991 : Digue frontale en enrochements (longueur 140 m) à l'arrière de l'épi n°28 (Clos de Brasinvert). Cote d'arase +2,2 m NGF.

1992-1994 : Digue frontale en enrochements (longueur 120 m) entre l'épi n°18 et la digue Fesquet (secteur de l'ancienne prise d'eau n°2). Cote d'arase +2,2 m NGF.

1994 : Digue frontale Comète en enrochements (longueur 140 m) à l'arrière des l'épis n°1E et 2E (Clos de la Comète). Cote d'arase +2,2 m NGF.

Etat actuel : La première digue (à l'arrière de l'épis n°28) est très dégradée ; elle est plus constituée d'un amas de cailloux de plus ou moins gros que de réels enrochements. Les deux autres digues sont bien entretenues.

1993 : Construction du petit Brise-lames est (ou petit brise-lames du Grand-Large).

Objectifs : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte, protection de la plage est des Saintes-Maries et des résidences en amont.

Maître d'ouvrage : Ville des Saintes-Maries.

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : brise-lames en enrochements, de 75m de longueur, situé à 80 m de la digue frontale. Cote d'arase +2,6 m NGF ; talus 3/2. Fait partie des aménagements prévus par l'étude SOGREAH (1989) dans le cadre de la protection du littoral Est de la ville des Saintes-Maries.

Etat actuel : Identique à l'initial.

Transfert de concession au SYMADREM depuis février 2001

3.6. AMENAGEMENTS EFFECTUES ENTRE 1995 ET 1999.

1995-1997: Construction d'une digue frontale au Brasinvert - entre épis 26 et 27

Objectifs : Ce secteur connaît des reculs très importants. Il convient de protéger les reliques dunaires et de connecter les épis entre eux. Ce dispositif complète les digues existantes (Angela, Fesquet...) dans le secteur compris entre le Radeau de Brasinvert et le Radeau de la Grille.

Maître d'ouvrage : CSMSE.

Maître d'œuvre : CSMSE et entreprise CROZEL.

Caractéristiques initiales : Digue en enrochements (200 m), construite en bas de plage connectant les épis n°26 et 27.

Etat actuel : en janvier 2003 digue endommagée (affaissement central).

1997 : Raccordement des épis 35 à 40 à la digue frontale « Pinède - Quatre-Maries ».

Objectifs : Rendre aux épis contournés par la mer leur rôle initial. Protection de la digue frontale.

Maître d'ouvrage : CIAM

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Section droite, en enrochements, de grand axe aligné à celui des épis. Côte d'arase : +2,2m NGF.

Etat actuel : En janvier 2003 les épis 34 à 40 sont partiellement démantelés sur la moitié de la longueur côté mer.

1998 : Extension vers la terre des épis 4E et 5E.

Objectifs : Raccordement à la côte des épis expérimentaux (secteur prise d'eau n°1) contournés par la mer.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : Rallonges vers la terre en enrochement, de +2,2m NGF de côte d'arase, de 48m de longueur pour l'épi 4E, 52m pour l'épi 5E.

Etat actuel : Identique à l'initial.

1998 : Extension vers la terre des épis 5, 9, 10.

Objectifs : Raccordement à la côte des épis contournés par la mer.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : Rallonges vers la terre en enrochement, de +2,2m NGF de côte d'arase, de 20 m d'extension.

Etat actuel : Identique à l'initial.

1997-1998: Construction d'une digue frontale entre les épis 6 et 7

Objectifs : Protection contre la submersion de ce secteur en s'appuyant sur un Radeau (extrémité du chemin de la Gracieuse).

Maître d'ouvrage : CSMSE.

Maître d'œuvre : CSMSE et entreprise CROZEL.

Caractéristiques initiales : Digue frontale en enrochements (200 m), construite en bas de plage connectant les épis n°6 et 7.

Etat actuel : Cote d'arase de l'ordre de 2,0 m NGF.

1998 : Extension vers la terre et cornières des épis 6 et 7.

Objectifs : Raccordement à la côte des épis contournés par la mer, construction de cornières à l'est pour éviter le renouvellement du phénomène.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : Rallonges vers la terre en enrochement, de +2,2 m NGF de côte d'arase, de 20 m d'extension. Cornières de 50m d'extension, +2,2 m de côte d'arase.

Etat actuel : Identique à l'initial.

1998 : Construction d'une digue frontale entre les épis 4E et 5E.

Objectifs : Protection contre les entrées de mer, protection du cordon dunaire.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : 155 m d'extension, côte d'arase +2,2 m NGF.

Etat actuel : Identique à l'initial.

1998 : Construction d'une digue frontale entre les épis 17 et 18.

Objectifs : Protection contre les entrées de mer, protection du cordon dunaire.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : 355 m d'extension, côte d'arase +2,2m NGF.

Etat actuel : Identique à l'initial.

1998 : Construction d'une digue frontale entre les épis 20 et 21.

Objectifs : Protection contre les entrées de mer, protection du cordon dunaire.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : 320 m d'extension, côte d'arase +2,2 m NGF.

Etat actuel : En janvier 2003, ouvrage fortement ensablé côté plage. Présente des signes de fatigue (couronnement) à l'ouest de l'épi 21.

1998 : Construction d'une digue frontale au droit de l'épi 24.

Objectifs : Protection contre les entrées de mer, protection du cordon dunaire.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : 45 m d'extension, côte d'arase +2,2m NGF.

Etat actuel : Quelques désordres. Ouvrage globalement bien conservé.

1999 : Extension vers la terre des épis 1 à 8, 11 à 18, 20, 21, 25 à 33.

Objectifs : Raccordement à la côte des épis contournés par la mer.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : Rallonges vers la terre en enrochement, de +2,2m NGF de côte d'arase. Rallonges respectives : épi 1 (55m), 2 (60m), 3 (65m), 4 (60m), 5 (43m), 6 (17m), 7 (13m), 8 (38m), 11 (50m), 12 (45m), 13 (44m), 14 (30m), 15 (31m), 16 (43m), 17 (40m), 18 (50m), 20 (50m), 21 (50m), 25 (50m), 26 (38m), 27 (30m), 28 (55m), 29 (55m), 30 (55m), 31 (45m), 32 (45m), 33 (65m).

Etat actuel : Identique à l'initial. En janvier 2003, les épis 31 et 32 sont en passe d'être contournés par la mer côté plage.

1999 : Construction de digues frontales entre les épis 5 et 6, 7 et 8, 12 et 13, 22 et 23, 27 et 28.

Objectifs : Protection contre les entrées de mer, protection du cordon dunaire.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : une côte d'arase identique à +2,2 m NGF, et des longueurs respectives :

- digue entre épis 5 et 6 = 230 m,
- digue entre épis 7 et 8 = 20 m,
- digue entre épis 12 et 13 = 230 m,
- digue entre épis 22 et 23 = 60 m,
- digue entre épis 27 et 28 = 170 m,

Etat actuel : La digue frontale présente entre les épis 27 et 28 est constituée également d'une partie résiduelle de digue construite en 1991, très dégradée.

1999 : Construction de digues frontales au droit des épis 14 et 15 (Radeau des Deux-Pins)

Objectifs : Protection contre les entrées de mer, protection du cordon dunaire.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : une côte d'arase identique à +2,2 m NGF, et des longueurs respectives :

- digue au droit de l'épi 14 = 98 m,
- digue au droit de l'épi 15 = 149 m.

Etat actuel : Identique à l'initial.

1999 : Construction d'une digue frontale entre les épis 16 et 17

Objectifs : Protection contre les entrées de mer, protection du cordon dunaire. Elle prolonge à l'ouest la digue construite entre les épis 17 et 18

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : 115m d'extension, côte d'arase +2,2 m NGF.

Etat actuel : Identique à l'initial.

3.7. AMENAGEMENTS EFFECTUES DEPUIS 2000.

2000 : Construction d'une digue frontale coiffant les épis 24 à 26.

Objectifs : Protection contre les entrées de mer, protection du cordon dunaire.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : 575 m d'extension, côte d'arase +2,2 m NGF.

Etat actuel : Identique à l'initial. Quelques désordres par secteurs (entre épis 24 et 25)

2001: Construction d'une digue frontale entre les épis 22 et 23

Objectifs : Protection contre les entrées de mer, protection du cordon dunaire. En prolonge vers l'ouest l'amorce de digue (longueur) de 60m construite en 1999.

Maître d'ouvrage : CSMSE

Maître d'œuvre : entreprise Crozel et CSMSE.

Caractéristiques initiales : 145 m d'extension, côte d'arase +2,2 m NGF.

Etat actuel : Identique à l'initial.

2002 : Reprofilage de la Digue à la mer et construction d'un tenon sur l'épi rive gauche du Petit Rhône.

Objectif : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage : SYMADREM

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Reprofilage sur 200 m de la Digue à la mer à partir du Petit Rhône avec une cote d'arase à +2,40 m NGF. En rive gauche embouchure du Petit Rhône, épi de 100 m de long, prolongé par un tenon de 60 m de long orienté parallèlement à la Digue à la mer, avec des cotes d'arase respectives de +2,60 m NGF (+2,30 m sur les 25 premiers mètres) et +2,10 m.

Etat actuel : Identique à l'initial

2002 : Construction d'un brise-lames de 110m dans le prolongement du tenon de l'épi rive gauche du Petit Rhône, au droit du camping du Clos du Rhône.

Objectif : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage : SYMADREM

Maître d'œuvre : Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques initiales : Brise-lames de 110 m de long, espacé de 80 m du tenon de l'épi rive gauche du Petit Rhône. Cote d'arase +2,00 m NGF. Relié à la Digue à la mer par un épi submersible (cote d'arase +0,80 m NGF) faisant office de piste d'accès au brise-lames.

Etat actuel : Identique à l'initial. Un deuxième épi similaire, distant de 80 m de l'actuel doit être construit.

4. Aménagements de type ganivelles

L'objectif principal recherché dans ce type d'aménagement est :

- la protection de la façade marine des massifs dunaires de la Réserve et du Parc Naturel
- le maintien d'un cordon dunaire afin que tous les stades d'évolution soient représentés.
- la protection des dunes contre les dégradations d'origine anthropique (piétinement).

Ils permettent par ailleurs de canaliser la circulation des piétons à travers les massifs dunaires.

Caractéristiques générales : Poteaux de bois de 1,75 m enfoncés sur 75 centimètres, équipés de contrefiches et organisés en casiers.

1986-1987 : Implantation de ganivelles de la Réserve Nationale de Camargue (RNC).

Localisation : Montille du Gênois (4 km est Pont du Rousty)

Maître d'ouvrage : Réserve Naturelle de Camargue.

Maître d'œuvre : Réserve Naturelle de Camargue.

Etat actuel : Aménagements entretenus, excepté dans les zones d'ensablement où ils ont été ensevelis (signe d'efficacité).

1988 : Implantation de ganivelles du Grand Radeau (PNRC).

Objectifs : Le but de ces aménagements étudiés par le bureau d'étude CEPREL est de protéger le bois de pins situé en arrière du cordon dunaire par un engraissement du haut de plage.

Maître d'ouvrage : PNRC.

Maître d'œuvre : Méditerranée Environnement Paysages.

Caractéristiques initiales : Poteaux de bois de 1,75m enfoncés sur 75 centimètres, équipés de contrefiches et organisés en casiers. De la canne de Provence est plantée au pied des poteaux.

Etat actuel : Depuis 1989, une digue frontale a été implantée à l'avant de ce secteur. Des rideaux de ganivelles sont implantés dans les secteurs compris entre les épis 36 à 40. A proximité de l'épi 40 les premiers rangs de ganivelles sont endommagés (surverse par dessus la digue frontale). Partout ailleurs les ganivelles ont bien fonctionnées. D'autres ganivelles sont implantées en arrière plage entre les épis 33 et 34.

1989-1996 : Implantation de ganivelles de la Réserve Nationale de Camargue (RNC).

Date et localisation :

- 1989-1990 : Radeau de la Foux Vieille (3 km à l'est Pont du Rousty)
- 1991 : Montille des Charles (600 m à l'est Pont du Rousty)
- 1992-1993 : Longue Montille (2 km à l'est Pont du Rousty)
- 1994 : Pont du Rousty et Montille des Tamaris (1 km à l'est Pont du Rousty)
- 1996 : Montille du Gênois (4 km est Pont du Rousty)

Maître d'ouvrage et d'œuvre : Réserve Naturelle de Camargue.

Etat actuel : Aménagements entretenus, excepté dans les zones d'ensablement où ils ont été ensevelis.

1990 : Implantation de ganivelles entre le port et la résidence de Crin Blanc (plage ouest des Saintes-Maries).

Objectifs :

- Stopper le franchissement de la zone dunaire par le sable en période de vent de mer, qui avait pour conséquence l'ensablement de la route en arrière de la plage.
- Capturer le sable par vent de Nord-Ouest le long de la digue du port afin d'éviter l'ensablement du chenal portuaire.
- Elargir le cordon dunaire.

Maître d'ouvrage : PNRC

Maître d'œuvre : Méditerranée Environnement Paysages.

Caractéristiques initiales : Poteaux de bois de 1,75m enfoncés sur 75 centimètres, équipés de contrefiches et organisés en casiers de taille variable. De la canne de Provence est plantée au pied des poteaux.

Etat actuel : Ces ouvrages sont surélevés d'un étage en 1992. Ils ont capté le sable des flux éoliens et se retrouvent donc ensablés aujourd'hui. Les ganivelles situées au droit de la résidence de Crin Blanc ont été rasées en 2002.

1992 : Implantation de ganivelles entre le pertuis de la Fourcade et les premières dunes, au droit du radeau des Tamaris (PNRC).

Objectifs : Reconstituer le cordon dunaire détruit.

Caractéristiques initiales : Poteaux de bois de 1,75m enfoncés sur 75 centimètres, équipés de contrefiches et organisés en casiers de taille variable. De la canne de Provence est plantée au pied des poteaux.

Etat actuel : Il semble que ces ouvrages, situés trop près de la mer, n'aient pas fonctionnés.

Maître d'ouvrage : PNRC

Maître d'œuvre : Méditerranée Environnement Paysages.

5. Aménagements en projet

Raccordement des épis 41 à 47 à la digue frontale du Grand Radeau.

Objectifs : Rendre aux épis contournés par la mer leur rôle initial. Protection de la digue frontale.

Maître d'ouvrage / d'œuvre : SYMADREM / Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques projet : Section droite, en enrochements, de grand axe aligné à celui des épis. Côte d'arase : +2,2 m NGF.

Reprofilage du Grand Epi Est et construction d'un tenon de 70m vers l'ouest.

Objectifs : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage / d'œuvre : SYMADREM / Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Reconstruction de l'épi transversal sur la plage « Camille » ouest.

Objectif : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage / d'œuvre : SYMADREM / Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Construction d'un brise-lames de 60 m au droit du poste de secours à l'ouest du Grau de la Fourcade.

Objectif : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage / d'œuvre : SYMADREM / Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Reprofilage de la digue à la mer (en cours).

Objectif : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage / d'œuvre : SYMADREM / Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

2004-2006 : Construction d'un épi brise-lames de 60 m devant le camping de la Brise (Est de la ville).

Objectif : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage / d'œuvre : SYMADREM / Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Rechargement en sable entre l'épis du Grand Large et le petit brise-lames du Grand Large.

Objectif : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage / d'œuvre : SYMADREM / Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

2004-2006 : Construction de deux épis droits sur la plage ouest des Saintes-Maries, de part et d'autre de la résidence de Crin Blanc.

Objectif : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage / d'œuvre : SYMADREM / Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques projet : deux épis droits (250 et 220m)

Prolongement en mer de l'épi est du Grau de la Fourcade.

Objectif : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage / d'œuvre : SYMADREM / Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Construction du grand brise-lames de la Brise, de 150m entre celui du camping de la Brise et celui du poste de secours.

Objectif : Protection de la digue à la mer, fixation du trait de côte.

Maître d'ouvrage / d'œuvre : SYMADREM / Services Maritimes des Bouches du Rhône (SM13).

Caractéristiques projet : construction d'un épi brise-lames de 150m entre celui du camping de la Brise et celui du poste de secours.

PARTIE II : CONTEXTE HYDRO-CLIMATIQUE REGIONAL

1. Les niveaux de la mer.

On appelle hauteur d'eau ou « niveau marin instantané » l'élévation instantanée de la surface de la mer. Cette valeur, très fluctuante dans le temps, est le résultat de la combinaison de trois variables : la « marée astronomique » (élévation périodique de la surface en réponse aux variations périodiques de l'attraction des astres) ; les vents et champs de pression en haute mer ; la pression atmosphérique et le vent locaux. La différence entre la hauteur d'eau observée et le niveau de marée (astronomique) est appelée « surcote », ou « décote », suivant qu'elle est positive ou négative.

1.1. LA MAREE ASTRONOMIQUE

La marée est de type semi-diurne avec inégalité diurne. L'amplitude de la marée atteint 0.4m en vive-eau (Sogréah, 1995), les niveaux de marée sont alors compris entre +0.2 et +0.6m CM (cote marine). Le zéro hydrographique (zéro des cartes marines) est situé 0.343m sous le zéro NGF.

1.2. PERIODES DE RETOUR DES HAUTEURS D'EAU MAXIMALES

En terme d'aménagement côtier, les ouvrages sont dimensionnés à partir de valeurs de référence de hauteur d'eau appelées souvent à tort « surcotes de projet ».

Pour la Camargue, les périodes de retour des élévations paroxysmiques de la surface de l'eau ont fait l'objet de plusieurs études depuis les 25 dernières années.

L'étude d'aménagement du littoral des Saintes-Maries-de-la-Mer (schéma de principe des ouvrages), effectuée conjointement par le LCHF et GEOMIDI en 1982, considère une hauteur d'eau à la cote **+1 m NGF** pour une période de retour centennale, et dimensionne donc les ouvrages à partir de cette valeur.

Le rapport SOGREAH (1995) établit à partir des enregistrements du marégraphe du Grau de la Dent (de 1985 à 1993) les périodes de retour suivantes (tableau II-1) :

Périodes de retour	Niveau d'eau NGF
2 ans	+0,82m
5 ans	+0,94m
10 ans	+1,02m
20 ans	+1,06m
50 ans	+1,18m
100 ans	+1,20m

Tableau II-1 : périodes de retour des niveaux exceptionnels (SOGREAH, 1995)

Ces chiffres sont obtenus par extrapolation, à partir d'une loi statistique de Gumbel (fig. II-1). Or, il est admis que les prévisions issues de ce type d'analyse sont peu fiables au-delà d'une durée trois fois supérieure à la longueur de la série statistique d'origine. Dans son étude même (volume II, première partie, p. 3.4~3.5), SOGREAH

indique d'ailleurs que « les niveaux correspondants aux périodes de retour 50 et 100 ans ne sont pas significatifs [...] et sont sans doute sous-estimés ».

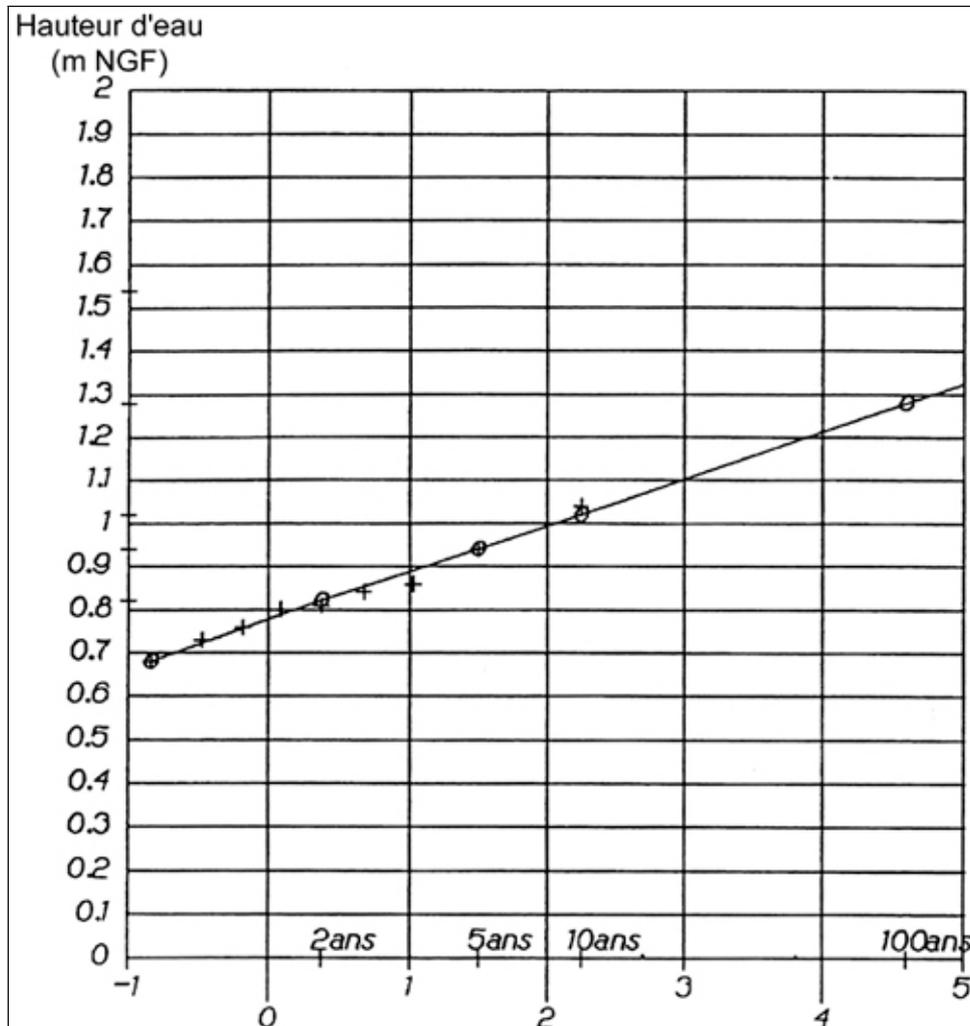


Figure II-1 : Répartition des niveaux extrêmes au Grau de la Dent par ajustement de Gumbel (1985-1993). SOGREAH, 1995

Au cours de la période 1982 à 1995, le limnigraphe du Pertuis de la Fourcade (à l'est des Saintes-Maries) enregistre deux niveaux d'eau proches de +1,3 m NGF durant la tempête de novembre 1982, +1,18 m NGF le 19/11/1994, et 4 niveaux de plus de +1,0 m NGF entre 1987 et 1994.

Suanez (1997), Suanez et al.(1997) proposent à partir du même traitement statistique, mais pour une série trois fois plus longue (1974 à 1995), les valeurs suivantes (tableau II-2) :

Périodes de retour	Niveau d'eau NGF
2 ans	+0,83 m
5 ans	+0,97 m
10 ans	+1,06 m
20 ans	+1,12 m
50 ans	+1,28 m

Tableau II-2 : périodes de retour des niveaux exceptionnels (Suanez, 1997)

En raison de la durée de la série statistique, les prévisions ne sont plus fiables au-delà d'une période de retour de 60 ans.

L'observation des niveaux maximums atteints au marégraphe du Grau de la Dent au cours des années 1996 et surtout 1997 (Bruzzi, 1998) confirme ce fait :

- les 13, 14, 15 et 16 octobre 1996, le niveau de la surface atteint successivement +0,9, +1,10, **+1,22** et + 1,09 m NGF ;
- du 5 au 13 novembre 1997, le maximum marégraphique journalier observé atteint successivement les valeurs de +1,1, +1,16, **+1,58**, +1,3, +1,14, +1,08, +1,08, +1,32, et +1,06 m NGF ;
- du 16 au 21 décembre 1997, les maximums quotidiens enregistrés sont successivement de +0,96, +1,5, **+1,48**, +1,5, +1,28, +1,02 m NGF.

A période de retour égale, il semble donc que le niveau d'eau de projet centennal (+1,2 m NGF) définie par SOGREAH avec des réserves, et reprise par SAFEGE-CETIIS (étude d'impact des aménagements des plages Est et Ouest des Saintes-Maries, 1999), sous-évalue sensiblement la réalité des élévations paroxysmales de la surface de la mer sur le littoral du Delta du Rhône.

1.3. ETUDE DES SURCOTES REELLES

On appelle surcote à un instant donné, la différence positive entre la hauteur d'eau de la mer observée et le niveau de marée astronomique au même instant.

Afin de caractériser le régime séculaire des surcotes réelles, Bruzzi (1998) a isolé par analyse harmonique la composante astronomique du niveau de la mer enregistré au Grau de la Dent. Le traitement statistique porte sur une série allant de 1904 à 1997, avec un hiatus de 12 ans entre 1962 et 1974, soit une étendue de 82 années. Il permet de mettre en évidence trois périodes distinctes (fig. II-2) :

- de 1904 aux années 1920, la hauteur moyenne des surcotes diminue ;
- des années 1920 au début du hiatus (1962), la tendance s'inverse et présente une hausse assez marquée de la hauteur des surcotes (entre 1921 et 1962, +18cm) ;
- de 1974 à aujourd'hui, les hauts niveau de surcotes atteints en fin de période précédente se maintiennent sans tendance à la hausse.

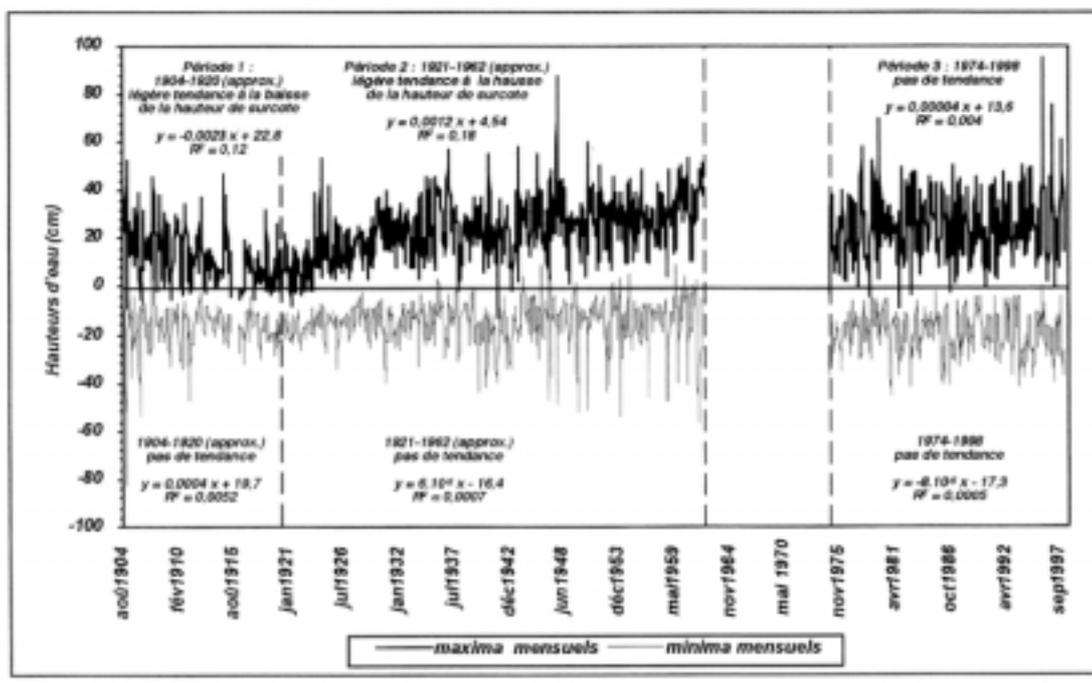


Figure II-2 : Surcotes et décotes maximales mensuelles entre décembre 1904 et février 1998 (Bruzzi, 1998).

L'analyse des rythmes saisonniers permet d'individualiser 3 périodes (fig. II-3) :

- de mars à mai les valeurs maximales sont assez faibles. Le mois d'avril associe une valeur maximale très faible et une faible variabilité (amplitude la plus faible de l'année : 43 cm). Les mois de mars et mai présentent une variabilité plus forte du côté des valeurs, confirmée par une forte amplitude (respectivement 52 et 57 cm). Cette variabilité n'est pas liée à des valeurs exceptionnelles ("outliers") pour ces mois.
- de juin à septembre les valeurs maximales sont les plus faibles et ont une variabilité modeste. Le mois d'août se démarque, affichant une plus forte variabilité liée à la présence de surcotes maximales exceptionnelles pour le mois. La figure II-3 indique une valeur exceptionnelle ("outlier") égale à 43 cm en 1987.
- les mois d'octobre à février montrent une forte variabilité avec des valeurs de surcotes maximales qui peuvent être très élevées, comme en décembre. Pour les mois d'octobre, novembre et janvier, la distorsion vers les surcotes maximales est appuyée par une forte amplitude (respectivement, 97 cm, 71 cm et 97 cm) et par des valeurs exceptionnelles ("outliers"). En janvier, les années de surcotes maximales exceptionnelles sont 1996 (95 cm), 1997 (73 cm) en octobre : 1979 (70 cm) , et en novembre : 1947 (88 cm).

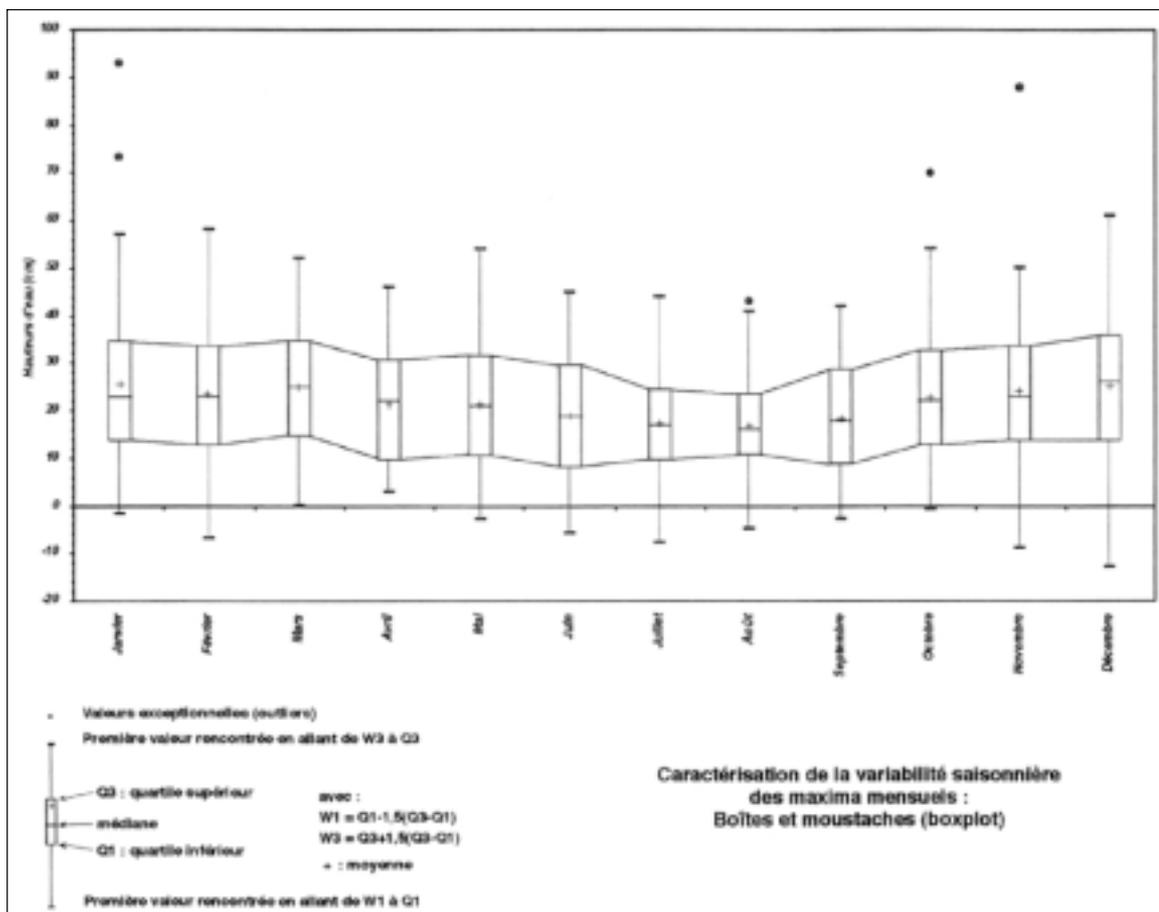


Figure II-3 : Caractérisation de la variabilité saisonnière des maxima mensuels. (Bruzzi 1998)

En automne et au cœur de l'hiver (octobre à février) les surcotes présentent les plus fortes ; elles s'intègrent dans un contexte climatique « favorable » (perturbations d'est).

En octobre et novembre, la forte intensité de certaines surcotes peut être inattendue pour la saison ("outliers"). Cette idée rejoint le problème posé par les agressions parfois brutales des premières tempêtes d'automne, qui surviennent après une période de relative récupération des plages.

1.4. SURCOTES EXCEPTIONNELLES AU COURS DU XX^{IE}ME SIECLE

A partir de l'étude détaillée des conditions météo-marines de tempête, Bruzzi (1998) considère qu'aux périodes de forte intensité des agents dynamiques (tempêtes) sont systématiquement associées des surcotes réelles supérieures à 30 cm.

Afin d'isoler les tempêtes exceptionnelles, elle effectue un seuillage à 40cm sur les données de surcote réelle issues du Grau de la Dent, et ne considère que les événements présentant au moins deux jours successifs de surcote. Ce traitement permet d'identifier 17 tempêtes sur les 82 ans d'étendue de la série statistique

(tableau II-3). Entre 1904 et 1962 (hiatus) 7 tempêtes sont recensées, 5 entre 1978 et 1982, 5 entre 1991 et 1997.

Périodes	Episodes avec au moins deux jours successifs de surcotes \geq 40cm	Surcote (cm)	Nombre de jours successifs
1904~1962	1-2 février 1937	43, 43 cm	2
	17-18-19 décembre 1945	55, 50, 41 cm	3
	19-20 mars 1956	42, 48 cm	2
	18-19 décembre 1958	40, 48 cm	2
	12-13-14 mars 1960	45, 51, 49 cm	3
	23-24 mars 1960	42, 45 cm	2
	16-17 avril 1962	52, 51 cm	2
1974~1998	24-25 février 1978	51, 43 cm	2
	27-28 janvier 1979	43, 42 cm	2
	10-11 février 1979	53, 47 cm	2
	26-27-28 octobre 1979	52, 70, 46 cm	3
	7-8-9 novembre 1982	47, 83 , 43 cm	3
	7-8 mars 1991	43, 45 cm	2
	6-7 janvier 1994	50, 45 cm	2
	9-10 janvier 1996	41, 95 cm	2
	23-24-25 janvier 1996	59, 44, 45 cm	3
	17-18-19 décembre 1997	61, 53, 44 cm	3

Tableau II-3: Surcotes supérieures à 40 cm pendant au moins deux jours. (Bruzzi, 1998)

1.5. VARIATIONS LONG TERME DU NIVEAU DE LA MER DANS LE DELTA DU RHONE

Par traitement statistiques des données issues des enregistrements des marégraphes d'Endoume (Marseille) et du Grau de la dent (Camargue), Suanez (1997), Suanez et al (1997) ont mis en évidence l'évolution séculaire du niveau marin pour ces deux stations. Malgré leur forte variabilité interannuelle, les niveaux marégraphiques montrent, depuis un siècle, **une tendance à la hausse**. A partir d'une régression linéaire effectuée sur une série statistique s'étendant de 1905 à 1993, l'élévation moyenne annuelle du niveau de la mer est évaluée à **+2,1 mm par an** en Camargue et +1,1mm pour Marseille

Or, en raison de la faiblesse des pentes des courbes des périodes de retour des niveaux de la mer (SOGREAH, 1995, Suanez, 1997), une élévation du plan d'eau, même minime, induirait une augmentation importante de la fréquence des hauts niveaux paroxysmaux. Afin d'apprécier le risque encouru par le littoral, Suanez (1997), se basant sur les estimations de Gornitz (1995) des variations eustatiques globales pour le siècle prochain (+48cm pour 2100), estime que cette élévation conduit progressivement à rendre plus fréquents des hauteurs d'eau maximales (fig. II-4) : aujourd'hui une hauteur de 1.25 m (NGF) est associée à une période de retour proche

de 100 ans ; en 2100 (considérant la courbe supérieure de la figure 4), la même hauteur aura une période de retour de 2 ans.

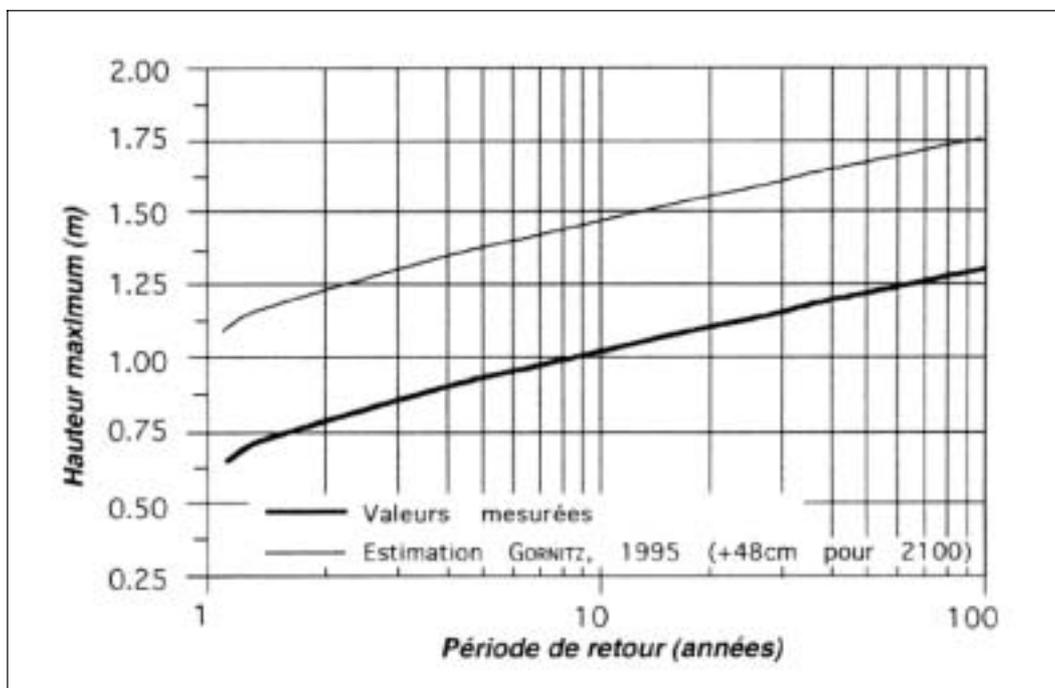


Figure II-4 : Périodes de retour des niveaux marins maxima en tenant compte des projections faites pour le siècle prochain. (Suanez, 1997)

2. Le climat de houle

2.1. REGIME DE HOULES AUX SAINTES-MARIES-DE-LA-MER.

A partir d'un houlographe « installé aux Saintes-Maries-de-la-Mer », et dont ni les caractéristiques, ni l'étendue de durée des mesures ne sont précisées, Blanc (1982) propose les données suivantes :

- Les houles issues du SO sont statistiquement majoritaires, suivies par les régimes de SSE. Les hauteurs maximales au large peuvent atteindre 7,5m (3 mesures en 14 années d'observations). La houle, de tempête moyenne a une hauteur de 3,43m pour une période de 5,5s ;
- Les très fortes houles, à hauteur maximale de 4,0 à 5,0 m sont liées à des ondes de SSO, puis SSE et S ;
- Les fortes houles, à hauteur moyenne de 2,5 à 3,0 m, sont rattachées à des ondes de provenance SE, puis SSE ;
- Pour une Hsig ⁽¹⁾ comprise entre 2,5 et 3m, avec une période moyenne de 5 à 7,5 s, on a une probabilité d'apparition de 2,16 %, soit une période de retour correspondant au demi-siècle.

Ne disposant pas d'indications concernant l'emplacement de cet appareil, il convient de considérer ces chiffres avec réserve.

2.2. REGIME DE HOULES AU CAP COURONNE

L'analyse du régime moyen repose sur les enregistrements effectués au houlographe du Cap Couronne entre le 24/09/1964 et le 24/09/1978. Ces données ont été traitées par SOGREAH (1994), le Port Autonome de Marseille (1993) et Vernier (1972) dont l'analyse, plus complète, ne porte que sur les années 1964 à 1969. Ce dernier met en évidence l'existence de trois directions dominantes (fig. II-5) :

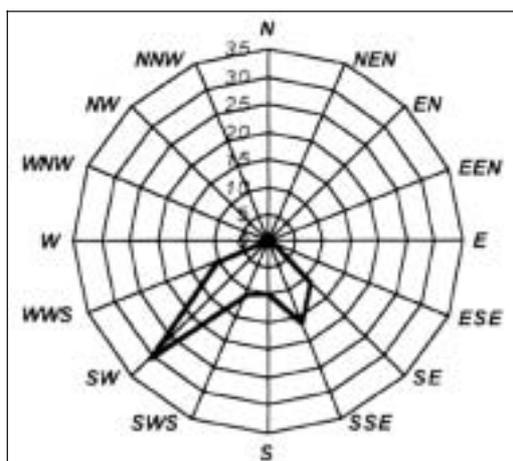


Figure II-5 : Régime des houles enregistrées au Cap Couronne de 1964 à 1969.
(Suanez, 1997)

¹ Hsig = Hauteur significative de la houle.

- **les houles de SW (30% du temps)** associées à des situations météorologiques de vents de terre (NW-NNW) ;
- **les houles de SSE (16,1% du temps) et les houles de SE (10,5% du temps)**, générées toutes deux par les vents marins d'ESE à E.

Les temps calmes, sans houle apparente, représentent 10% du temps.

Suarez (1997) a étudié la répartition des hauteurs et des périodes significatives (hauteur et période moyenne du tiers supérieur des houles enregistrées pour une durée donnée) pour ces 3 secteurs. Il observe (fig. II-6 et 7) :

- Pour les houles de SW, les hauteurs significatives (H_{sig}) comprises entre 0,5 et 1,5m sont les plus fréquentes (66% du total). Les hauteurs supérieures à 2m représentent moins de 9%. Les périodes significatives (T_{sig}) les plus fréquentes se situent entre 4 et 6 secondes (>80% du total), les T_{sig} supérieures à 7 secondes sont relativement rares (2%).
- Les houles de SSE montrent une distribution dont les H_{sig} comprises entre 0,5 et 1,5m représentent 56% du total. On note toutefois une augmentation de la fréquence des H_{sig} supérieures à 2m (16%). Les T_{sig} comprises entre 4 et 6 secondes sont les plus fréquentes (75%), les T_{sig} supérieures à 7 secondes sont faibles (40%).
- Les houles de SE présentent des H_{sig} plus importantes ; 50% des enregistrements sont compris entre 1m et 2m alors que 35% sont supérieurs à 2m. Comme pour les houles de SSE, les T_{sig} comprises entre 4 et 6 secondes représentent 75% du total, en revanche, les T_{sig} atteignant 8 secondes sont plus fréquentes (6%).

D'après ces observations, le régime des houles est donc marqué par trois directions, dont on peut regrouper les deux dernières, assez proches par leurs caractéristiques :

- les houles les plus fréquentes sont de secteur SW-WSW mais leur agressivité est réduite par les faibles H_{sig} et T_{sig} qui les caractérisent ;
- les houles de SE et de SSE sont moins fréquentes mais caractérisées, surtout pour les premières, par une H_{sig} et une T_{sig} plus importantes et sont donc plus agressives.

A partir de ces mêmes enregistrements (1964-1969), mais en se basant sur l'énergie des agitations (carré de la hauteur multiplié par la période : H^2T), SOGREAH (1995) conclue que :

- les calmes représentent 16,6 % des cas,
- la hauteur des vagues est **inférieure ou égale à 2 m pour 97 % des cas et ne dépasse 3 m que 0,4 % du temps**,
- **les agitations proviennent le plus fréquemment du SW-WSW (40 % des cas), SE-SSE (26 %) et S-SSW (14,7 %)**,
- si les agitations en provenance du SW-WSW prédominent, leur hauteur significative ne dépasse pas 3 m ; **les plus fortes vagues proviennent du SSW, du Sud et du SSE.**

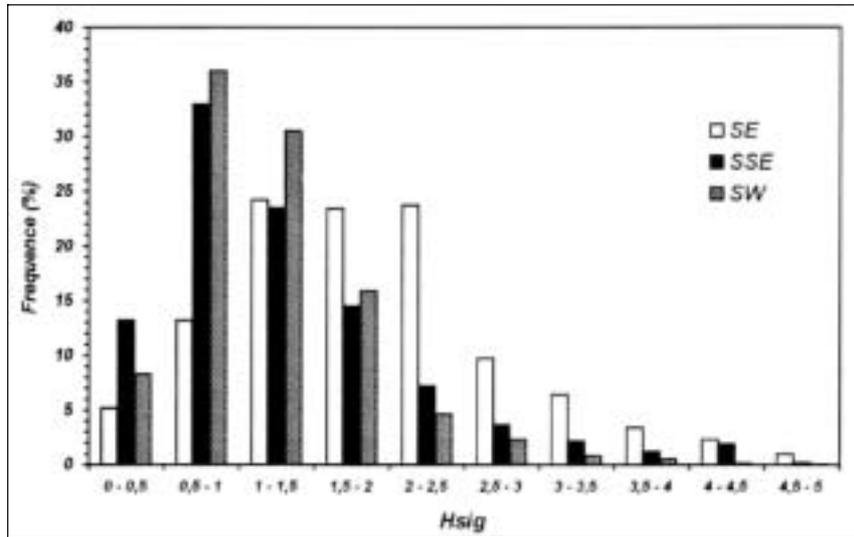


Figure II-6 : Distribution des hauteurs significatives par directions dominantes. (Suanez, 1997)

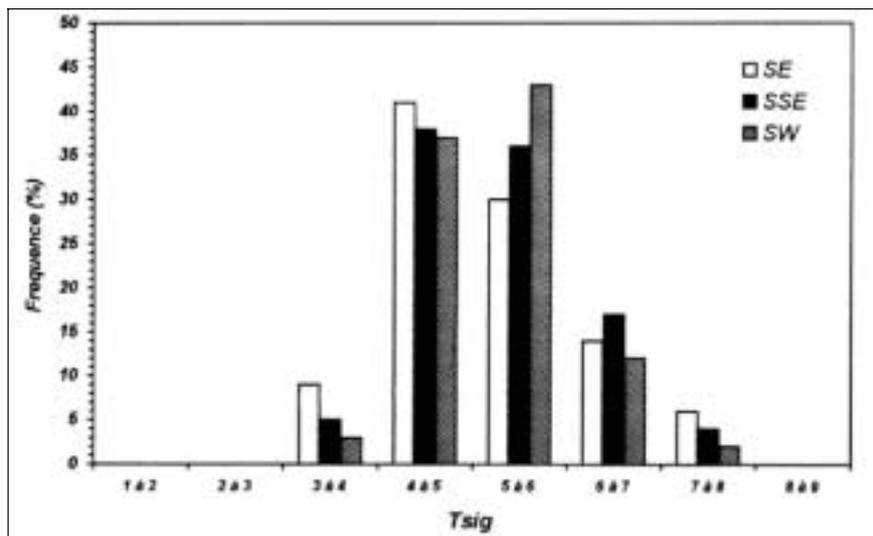


Figure II-7 : Distribution des périodes significatives par directions dominantes. (Suanez, 1997)

Or, d'après SOGREAH (1995), du fait de sa position géographique, le Cap Couronne est moins exposé à l'agitation en provenance des secteurs E à SE que ne l'est le littoral camarguais, et l'agitation de SW y est de fait prédominante. Afin de s'affranchir de l' « effet de site », SOGREAH s'intéresse donc à l'agitation au large.

2.3. LE REGIME AU LARGE

Afin d'évaluer le régime des houles au large du delta du Rhône, l'étude SOGREAH s'est appuyée sur les observations des navires (synoships) codifiées par l'Organisation Météorologique Mondiale et la Météorologie Nationale concernant la zone comprise entre 43° et 44° de latitude Nord et 4° et 5° de longitude Est.

Sur 19 ans (1961 à 1980), 3134 cotations d'état de mer et 3150 cotations de houles (hauteur, période et secteur) sont disponibles. Seules les agitations incidentes à la côte sont prises en compte, soit les secteurs compris entre 85° et 265°. L'énergie des agitations par secteurs se répartit comme suit (fig. II-8) :

- **E à SSE (85° à 165°), 69% de l'énergie.**
- **SSE à SW (165° à 225°), 17% de l'énergie.**
- **SW à W (225° à 265°), 14% de l'énergie.**

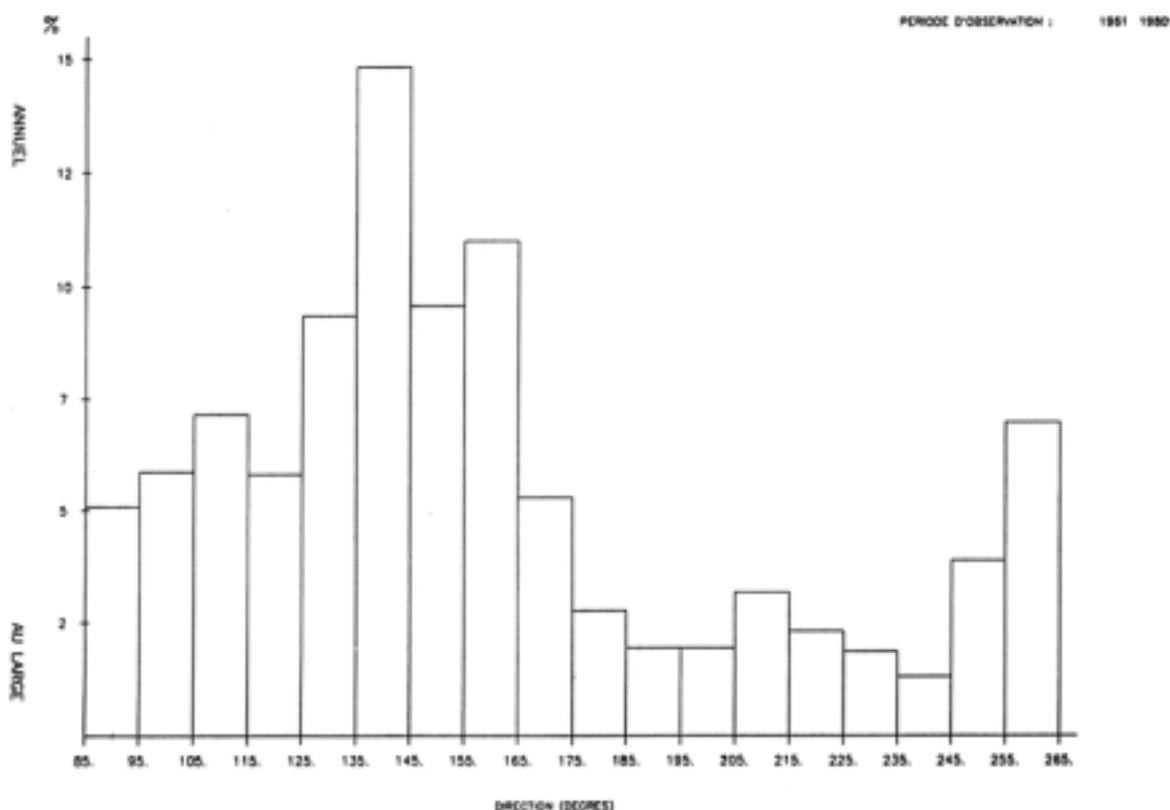


Figure II-8 : Distribution par secteur de l'énergie des vagues au large. (SOGREAH, 1995)

Contrairement aux données issues des enregistrements du houlographe de Cap Couronne, il semblerait que l'agitation enregistrée au large de la Camargue provienne principalement des secteurs ESE (105-115°) à S (175-185°), en fréquence comme en intensité, et surtout des secteurs SE (135°) à SSE (155-165°).

A partir de ces données (période 1961-1980), SOGREAH propose des valeurs de hauteur significative pour des périodes de retour données (tableau II-4) :

Périodes de retour	Hsig en m
2 ans	5m
5 ans	6m
10 ans	6,6m
50 ans	8,5m

Tableau II-4 : Périodes de retour des hauteurs de houle (SOGREAH, 1995)

2.4. PROPAGATION DES HOULES A LA COTE

A l'approche des côtes, les houles en provenance du large « sentent » le fond : à partir d'une certaine profondeur d (d'après la théorie linéaire $d=1/2L_o$, soit la demi-longueur d'onde de la houle au large) leur propagation est influencée par la bathymétrie, et les crêtes de houles tendent à devenir parallèles aux isobathes. Ce phénomène se nomme réfraction des houles. Il induit une concentration de l'énergie sur les saillants (cap, flèches, etc...) par convergence des orthogonales (aux lignes de crête) de houle et un étalement sur les rentrants (criques, golfes, etc...) par divergence des orthogonales de houles.

On rend compte de ces phénomènes par le calcul des coefficients de réfraction (K_r) en plusieurs point d'un littoral pour les secteurs de houle dominants, et pour une période de houle donnée. Ces coefficients traduisent le rapport de la hauteur des houles à la côte sur la hauteur de la houle au large. Ce coefficient est fonction de la direction de la houle au large et de la bathymétrie. Les valeurs de K_r calculées jusqu'à la côte traduisent :

- L'atténuation de l'énergie lorsque $K_r < 1$ ou 100% (divergence des vagues),
- La conservation de l'énergie lorsque $K_r = 1$ (propagation rectiligne des vagues),
- La concentration de l'énergie lorsque $K_r > 1$ (convergence des vagues),

En Camargue occidentale, deux séries de calcul des coefficients de réfraction sont disponibles. Il s'agit de ceux de SOGREAH (1995, calculs datés de mars 1994), et de Sabatier (1997).

2.4.1. Résultats de SOGREAH

Les calculs ont été effectués avec le logiciel REFRAN développé par SOGREAH pour une houle de période T_o égale à 7s caractéristique des houles observées en Camargue ⁽²⁾ entre le large et la côte, en tenant compte des effets de réfraction induits par les fonds. Ils sont conduits pour les secteurs de houle SE (135°), S (180°) et SW (225°), les résultats sont donnés pour des fonds de 3m, du Rhône Vif au fond du Golfe de Beauduc (fig. II-9).

² Cette période de 7s (ou supérieure) est associée aux plus fortes hauteurs significatives Hsig annuelles (supérieures à 1,8 m) qui représentent 5% des houles dans l'année, selon les observations réalisées entre juillet 1999 et mai 2001 au large de la Pointe de Beauduc.

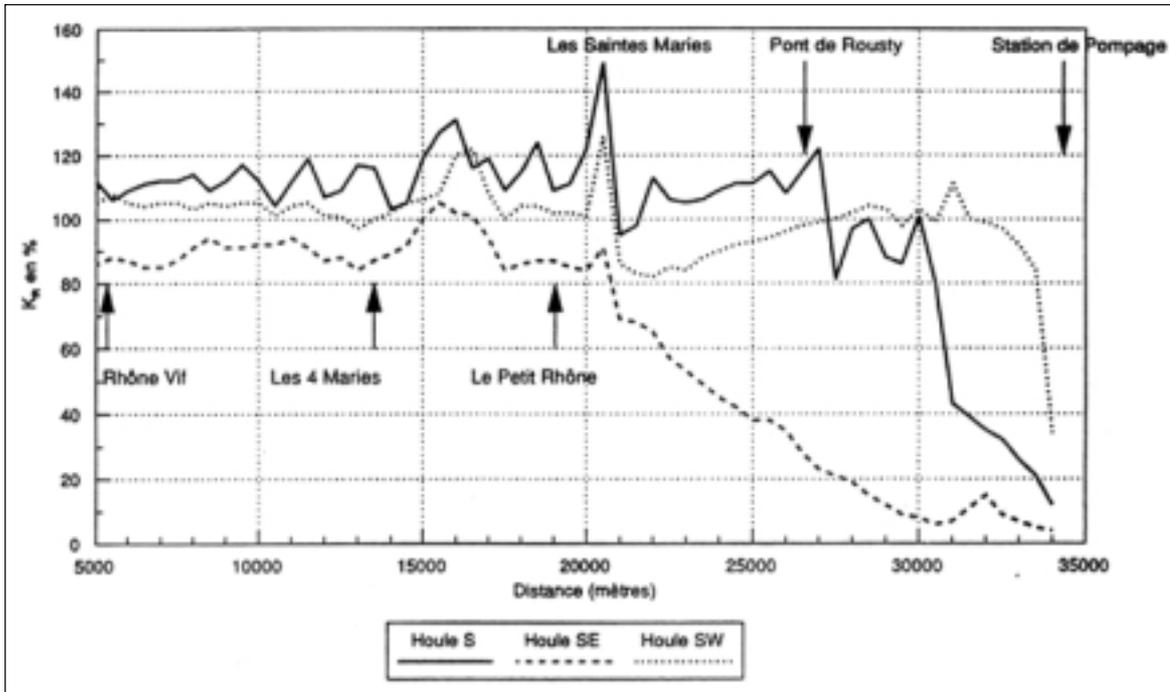


Figure II-9 : Variation du coefficient de réfraction du Rhône Vif à Beauduc (SOGREAH, 1995).

Le graphique 9 présente des valeurs de convergence très élevées ($K_r > 1,1$, ou 110%) pour les houles de secteur S du Rhône Vif au Pont de Rousty, de même que pour le secteur SE du Rhône Vif aux Saintes-Maries, et de Pont de Rousty au Phare de la Gacholle ($K_r > 1$, ou 100%).

Ces chiffres sont à considérer avec précaution, en effet, des valeurs de K_r supérieures à 1 (100%) correspondent à une convergence des orthogonales de houle, c'est à dire une concentration de l'énergie des vagues sur un point précis. Des valeurs aussi élevées correspondent généralement à des caps ou des promontoires possédant des avancées sous-marines.

Ces chiffres élevés peuvent s'expliquer par l'utilisation d'un plan bathymétrique ancien (1974), qui comporterait encore les traces des différents prodeltas fossiles des côtes de Petite Camargue. Ces prodeltas agiraient alors comme autant "d'obstacles" sous-marins et concentreraient l'énergie des houles, en particulier sur le secteur de l'embouchure du Petit Rhône qui montre les K_r les plus élevés.

2.4.2. Résultats de Sabatier (1997)

En utilisant la « méthode des crêtes », Sabatier a tracé les plans de vagues pour une houle de période $T_0=7s$, qui correspond à une houle de tempête de longueur d'onde au large $L_0=76 m$, et de hauteur supérieure à 2 m, correspondant à une période de retour annuelle ou bi-annuelle. Les houles sont propagées à partir des relevés bathymétriques du SHOM de 1995. Les résultats obtenus (tableau II-5) semblent plus cohérents que ceux de SOGREAH.

Du phare de l’Espiguette au pont de Rousty, les houles de SW sont affectées de coefficients de réfraction élevés qui traduisent l’agressivité importante de ce secteur de houle sur la Petite Camargue. Le secteur du Grand radeau à l’embouchure se distingue par des valeurs plus faibles en raison de la présence de reliques du prodelta du Petit Rhône.

Secteur	Kr	
	SE	SW
Phare de l’Espiguette	0,80	1,00
<u>Clos de la Comète</u>	0,90	0,90
<u>Grand Radeau</u>	0,95	0,90
<u>Embouchure</u>	0,80	0,90
<u>Saintes-Maries</u>	0,70	0,85
<u>Pont de Rousty</u>	<u>0,50</u>	0,85
Grau de la Comtesse	0,20	1,00

Tableau II-5 : Coefficients de réfraction Kr par zone géographique et par secteur de houle au large. (Sabatier, 1997)

Les houles de SE ont également un impact important sur la petite Camargue ($Kr > 0,9$), en particulier sur les secteur du Grand Radeau. A partir des Saintes-Maries, les coefficients de réfraction diminuent en direction du fond du Golfe, qui est abrité par la pointe de Beauduc.

Pour des Kr similaires pour les deux directions de houle (SE et SW), hormis sur les secteurs des Saintes, Rousty et Comtesse, on retiendra que les houles des secteurs E à SSE qui représentent 69 % de l’énergie annuelle dissipée sur le littoral, sont celles qui impriment le plus la dynamique sédimentaire régionale.

3. Régime des vents en Camargue

Dans le delta du Rhône, le régime des vents dominants est caractérisé par deux directions opposées : les vents de terre, de secteur NW et N-NW correspondant en partie au Mistral et à la Tramontane, et les vents de mer de secteur Est et E-SE avec, en proportion moins importante, les vents de secteur Ouest.

Les vents de terre représentent 34% à 37% du régime total; le plus fréquent (Mistral), de secteur NW, souffle tout au long de l'année. Ce vent particulièrement violent est caractérisé par une vitesse moyenne de 8 à 11m/s, il dépasse fréquemment 25m/s. La Tramontane, vent de secteur N-NW, moins fréquente, est caractérisée par des vitesses plus importantes (vitesse moyenne de 11 à 14m/s et maxima supérieurs à 28m/s). Le vent d'W-WNW souffle sur de courtes durées mais il est particulièrement violent (10 à 14m/s). Les vents de secteur Nord restent faibles, tant en puissance qu'en fréquence.

Les vents de mer soufflent en moyenne entre 20% et 30% de l'année. Les vents de secteur E à SE (Levant, Eissero) sont les plus fréquents, leur vitesse peut atteindre plus de 22 m/s. Les vents de secteur W à SW sont moins fréquents et moins forts. Les enregistrements effectués entre 1962 et 1995 par la station météorologique du Cap Couronne permettent de donner une répartition moyenne des vents de mer sur l'année (tableau II-6).

Vitesses (m/s)	Direction dominante des vents de mer					Vents de terre toutes directions
	E	SE	S	SW	W	
< 10	6,9	9,9	2,3	3,7	7,9	nd
de 10 à 17	2,4	5,9	0,4	0,7	4,1	nd
> 17	0,8	1,6	0,0	0,2	0,9	nd
Total	10,1	17,4	2,7	4,6	12,4	52,8

Tableau II-6 : Répartition des vents de mer dominants en fonction de la vitesse. (Suarez, 1997) - nd = donnée non disponible

L'étude des vents tri-horaires met en évidence une variation saisonnière caractérisée par le renforcement des vents d'ouest au printemps et en été (figure 10) et un renforcement des vents à l'automne et en hiver (tableau II-7) :

- les vents de terre ne présentent aucune distribution saisonnière marquée. Ils soufflent tout au long de l'année. Cependant, leur fréquence augmente durant la période hivernale (mois de février et mars).
- les vents de mer sont généralement liés aux tempêtes d'équinoxe (automne et printemps). Les vents d'Est à E-SE sont dominants durant l'automne et l'hiver où ils atteignent les vitesses les plus importantes (10m/s). Ils décroissent dès le printemps, relayés par des vents de secteur SE à SSE. Particulièrement violents ($V > 22$ m/s), les vents de secteur W à SW soufflent surtout durant la période estivale, du mois de Juin à la fin du mois d'Août.

Vitesses	Automne	Hiver	Printemps	Eté
<10m/s	69,5%	68%	70%	79%
11m/s à 19m/s	26%	27%	26,5%	19%
>20m/s	4,5%	5%	3,5%	2%

Tableau II-7 : Répartition saisonnière des vitesses du vent entre 1962 et 1994. (Suanez, 1997)

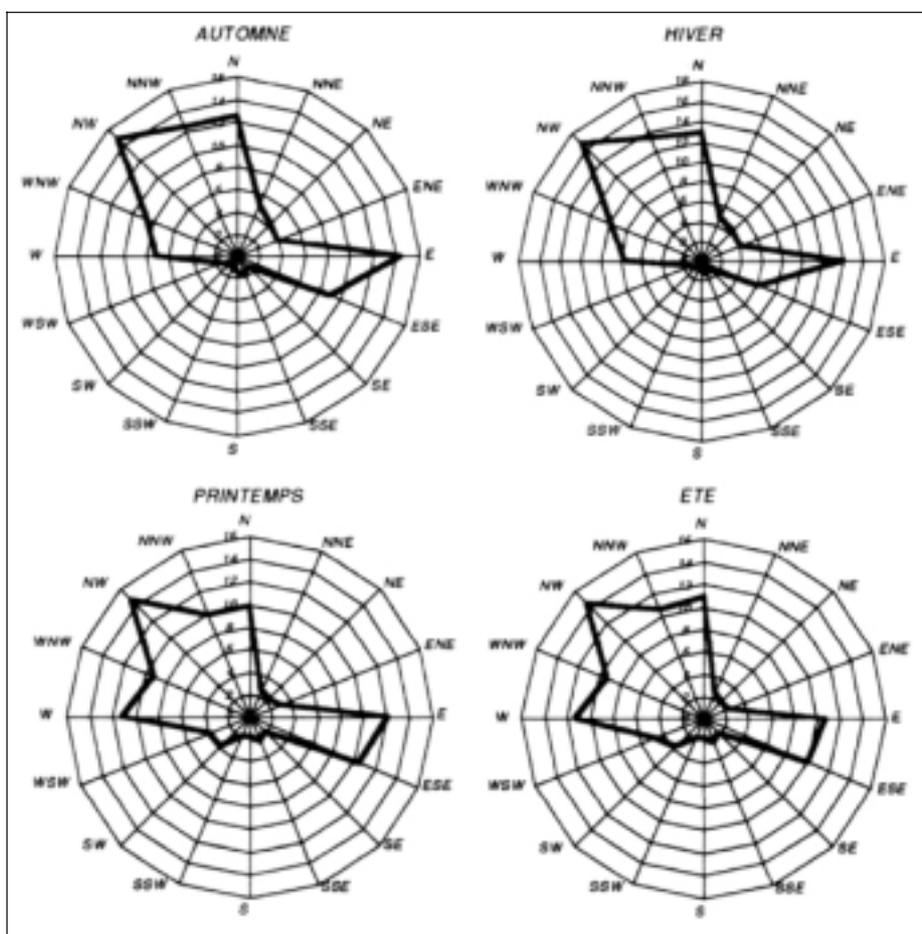


Figure II-10 : Distribution saisonnière des directions de vent

En conclusion, le régime des vents sur le littoral du delta du Rhône est caractérisé par deux directions principales : les vents de NW et NNW (Mistral, Tramontane) et les vents d'E à ESE. Les vents de terre soufflent toute l'année, ils sont toutefois particulièrement violents durant la période hivernale (février). Les vents de mer, liés aux tempêtes d'E-SE, sont actifs durant les périodes d'équinoxe. Des vents violents de secteur W-SW apparaissent également à la fin du printemps et de l'été.

PARTIE III : SYNTHÈSE DES ÉVOLUTIONS DU LITTORAL

1. Introduction

L'ensemble du littoral de Camargue est affecté de mouvements sédimentaires conditionnés par des dynamiques (apports terrigènes, dynamiques météo-marines,...) dont l'échelle géographique et l'intensité varient avec le temps. Ces mouvements se traduisent par des phénomènes d'ablation et de redistribution des matériaux qui déterminent le recul ou l'avancée de la côte. Afin de quantifier les évolutions du trait de côte, résultantes des flux sédimentaires, qui affectent le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer, l'étude des vitesses de recul ou d'avancée du trait de côte à l'échelle séculaire paraît un outil approprié. Cette étude permet :

- de mettre en évidence des zones sur lesquelles le risque de submersion, lié au recul continu du trait de côte risque sur la longue période, diminue, demeure ou s'aggrave
- de mettre en évidence l'impact des actions de protection du trait de côte.

L'ensemble du littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer subit depuis plusieurs siècles d'importants phénomènes d'érosion. Une illustration de ces évolutions est donnée sur les figures III-1 et III-2, qui représentent la situation du littoral dans les années 1770. Depuis le XVI^{ème} siècle, le littoral des Saintes est en érosion. Depuis l'abandon par le Rhône de son bras de Saint-Ferréol (époque romaine), dont l'embouchure était localisée à peu de chose près à 4 km au large du village des Saintes, et malgré le retour d'un écoulement par le Petit Rhône, la dynamique sédimentaire a été profondément modifiée.



Figure III-1 : Carte de Cassini (Carte levée entre 1770 et 1775 par Renault, Le Jeune, Langelay, 116^{ème} feuille publiée)

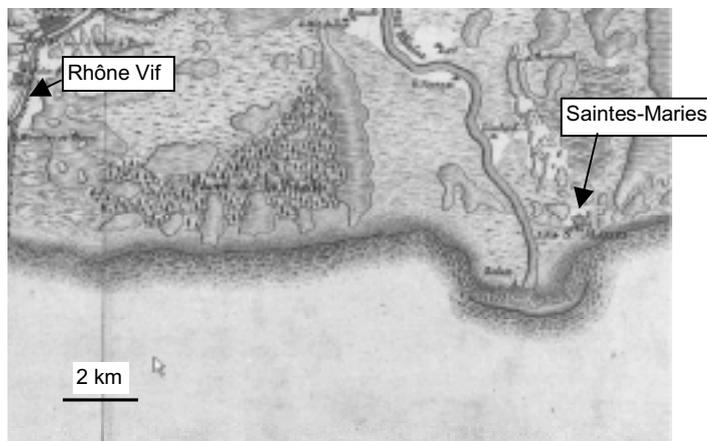


Figure III-2 : Extrait de la Carte de Cassini (Saintes-Maries et Petit Rhône)

Le littoral a été totalement remodelé, et singulièrement l'embouchure du Petit Rhône (fig. III-2.) L'une des causes principales de ces phénomènes en sont les profondes modifications qui ont affecté le cours du Rhône depuis ces derniers siècles avec finalement depuis la fin du XIXème, la fixation définitive de son embouchure à l'extrémité est du delta. L'hydraulicité réduite du Petit Rhône actuel, et les transits sédimentaires du Grand Rhône qui s'effectuent plus difficilement vers l'ouest en direction de Faraman, puis du Golfe de Beauduc conduisent à un déficit d'alimentation en sédiments de tout le littoral.

Au cours du XXème siècle, l'érosion se poursuit. Elle se traduit par le recul du trait de côte et par la poursuite de l'abrasion du prodelta résiduel situé face à l'embouchure du Petit Rhône. Un comparatif (Sabatier, 2001), des bathymétries réalisées par le SHOM en 1895 et 1974/82, montre clairement l'abaissement des fonds au droit du Petit Rhône, à l'est jusqu'au secteur du Pont du Rousty et sur tout le littoral sur une longueur de 20 km à l'ouest du Petit Rhône. Cet abaissement des fonds s'est produit jusqu'à 1500m de la ligne de côte actuelle, où il peut atteindre 2 m. Le phénomène d'abaissement des fonds s'est poursuivi depuis 1974. Face au village, les profondeurs de 5 m sont à présent à 200-250 m de la côte ; elles étaient à 750 m à la fin du siècle dernier.

Les sédiments marins remobilisés contribuent à la dynamique sédimentaire littorale. Le démantèlement progressif du prodelta a contribué et contribue toujours à l'alimentation des plages connexes.

Le régime de houle conduit à des dominantes de transit sédimentaire commandées par les conditions les plus énergétiques, à savoir les régimes de sud-est et de sud-sud-est. Le transit porte à l'ouest en Petite Camargue, à l'est dans le secteur ouest du Golfe de Beauduc.

L'évolution du trait de côte depuis 1895 va être analysée à la suite.

2. Méthode

La méthode et les résultats qui suivent sont issus de la thèse de F.Sabatier (2001), qui a procédé par interprétation des données numérisées (année 1895) du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine), par photo-interprétation (années 1944, 1953~54, 1963, 1977~79, 1987~90, 1995~96) des clichés aériens de l'I.G.N., de la société Aerial et du Centre Camille Julian et par relevé au DGPS de la position du trait de côte en 2000 (position du milieu du jet de rive.)

Les photographies aériennes sont assemblées en mosaïque afin de couvrir tout le secteur étudié. Le tracé du rivage est redessiné et géométriquement recalé sur un fond topographique IGN de référence au 1/25000e (StéréoZoom -TransfertScope Baush&Lomb.) Les corrections géométriques sont effectuées à partir de référents invariants (ruines, phares, carrefours...) Les différents traits de côte, tous à la même échelle, sont ensuite scannés et numérisés sur ordinateur avec une résolution de 4 mètres au sol dans un référentiel commun (Lambert III Sud.) Pour cette étude, nous avons eu communication des données chiffrées obtenues par F. Sabatier. Les figures III-5 à III-8 et III-10 à III-12 reprennent ces données.

Les données relatives à la position du trait de côte en 1982, 1992, 1998 sont issues de la présente étude. Les données de F. Sabatier sur le profil P56 localisé en rive droite de l'embouchure du Petit Rhône n'ont pas été reprises ⁽³⁾. On retiendra qu'au droit de l'embouchure, le trait de côte a reculé de près de 800 m à l'ouest et de 600 m à l'est entre 1895 et 2000.

Les prises de vue aériennes des missions IGN de 1982 et 1992 ont été numérisées puis rectifiées géométriquement et géoréférencées en prenant appui sur la mission 1998, pour laquelle nous disposons de l'orthophotographie couleur produite par l'IGN.

³ En effet, l'évolution du trait de côte a été extraite suivant un profil qui suit la direction du débouché et non une direction perpendiculaire au profil. Compte tenu de la morphologie particulière au droit de ce profil (lobe deltaïque hérité) les valeurs fournies par F. Sabatier ne peuvent être comparées aux valeurs des autres profils.

3. Evolution du trait de côte

La comparaison diachronique des traits de côte entre 1895 et 2000 réalisée sur 34 profils repères (P36 à P69) met en évidence l'existence de comportements différents en fonction des secteurs du littoral. On distingue cinq grands secteurs (fig. III-3) en fonction de leurs tendances d'évolution sur l'ensemble de la période, d'est en ouest :

- secteur du fond du golfe de Beauduc (étang de Galabert) en accrétion (P36 à P42),
- secteur de l'étang des Batayolles stable (P43 à P46)
- secteur de l'étang dit l'Impérial en érosion (P47 à P51)
- secteur de l'agglomération des Saintes-Maries globalement stabilisé par les ouvrages de protection (P52 à P55)
- secteur ouest du Petit Rhône en érosion (P56 à P69)

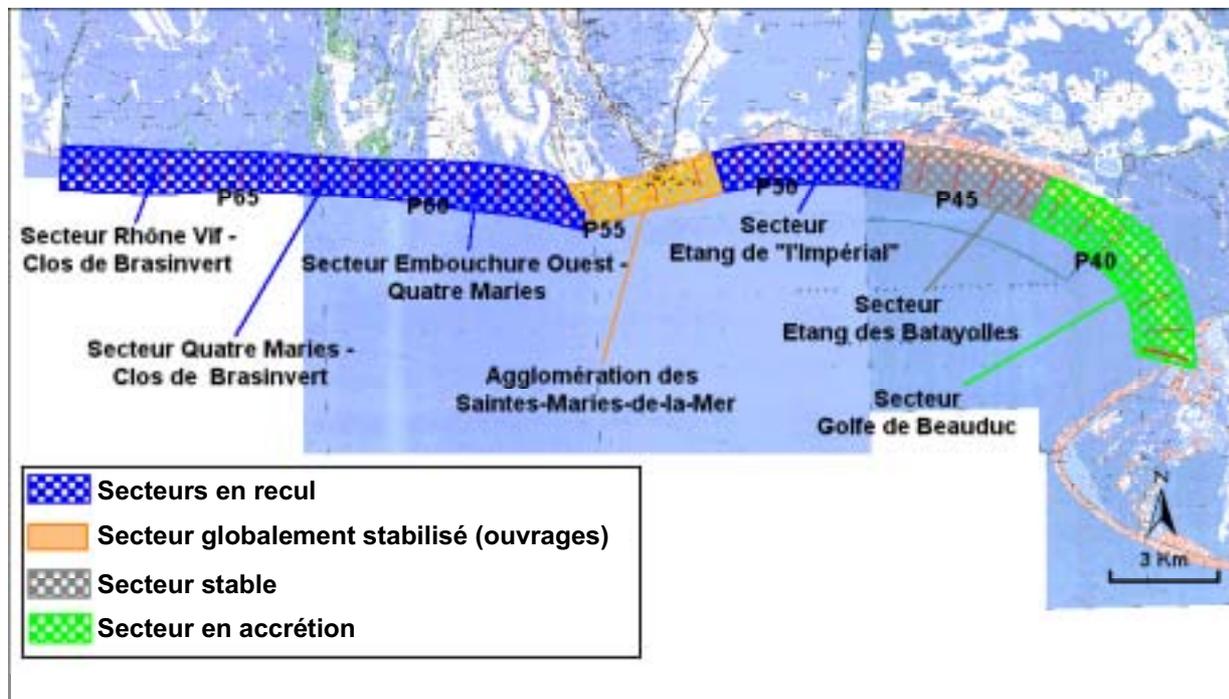


Figure III-3 : Tendances d'évolution du littoral par secteurs.

Les ouvrages de protection, installés très tôt sur les bords de mer du village des Saintes-Maries, rénovés et adaptés jusqu'à nos jours ont permis de préserver la position du trait de côte depuis les années 70-80. Ceci explique la singularité que constitue ce secteur dans le schéma global.

Le tableau III-1 reprend les vitesses d'évolution (avancée ou recul) du trait de côte sur les 34 profils, en valeur moyenne annuelle par période. La figure III-4 représente l'évolution de la position du trait de côte de façon schématique (valeurs aux profils) depuis 1895.

Secteurs morphologiques	Profils	1895 1944	1944 1952	1952 1963	1963 1979	Moy 1895 1979	1979 1987	1987 1995	1995 2000	Moy 1979 2000	Moy 1895 2000
golfe de Beauduc	P36	11,0	0,0	9,2	2,8	8,1	-2,8	0,0	8,0	0,8	6,6
	P37	6,3	0,0	7,0	5,5	5,6	2,7	5,0	16,0	6,7	5,8
	P38	5,3	1,3	9,1	5,6	5,4	2,0	3,8	10,0	4,6	5,3
	P39	3,8	0,9	8,7	2,7	3,9	2,0	3,0	8,0	3,8	3,9
	P40	4,4	0,8	7,8	1,3	3,8	1,8	2,5	4,0	2,6	3,6
	P41	3,9	1,1	5,4	1,5	3,3	1,6	1,9	0,0	1,3	2,9
étang des Batayolles	P42	2,3	3,6	2,8	1,1	2,2	0,5	1,7	2,0	1,3	2,1
	P43	1,7	3,6	-1,1	0,8	1,4	0,0	1,6	1,9	1,1	1,3
	P44	1,8	4,0	-0,3	0,8	1,6	-0,9	1,7	-2,8	-0,4	1,2
	P45	1,2	3,6	0,1	-0,5	1,0	-1,8	1,6	-3,5	-0,9	0,6
étang dit « l'Impérial »	P46	0,5	3,2	1,1	-0,5	0,6	-2,3	0,2	-2,3	-1,3	0,2
	P47	-0,1	-0,4	-0,8	-1,3	-0,5	-2,4	-1,0	-3,5	-2,1	-0,8
	P48	-0,3	-0,9	-0,8	-4,8	-1,3	-3,6	-1,8	0,9	-1,8	-1,4
	P49	-1,1	-1,8	-1,1	-7,2	-2,4	-4,1	-3,1	-3,2	-3,5	-2,6
	P50	-1,6	-2,1	-2,2	-5,3	-2,5	-5,0	-4,0	-4,5	-4,5	-2,9
agglomération des Saintes-Maries	P51	-5,7	-1,9	-4,9	-5,1	-5,1	-6,2	-5,9	-6,7	-6,2	-5,3
	P52	-12,8	-2,2	-1,0	4,7	-6,8	-1,0	0,0	0,0	-0,4	-5,6
	P53	-3,2	-0,5	-0,9	8,0	-0,4	1,0	0,4	0,0	0,5	-0,2
	P54	-2,6	-14,2	-1,0	-6,7	-4,3	-1,2	-0,3	-2,9	-1,3	-3,7
embouchure Petit-Rhône - Quatre Maries	P55	-6,3	-12,4	-3,0	-11,2	-7,5	2,0	0,0	0,0	0,8	-5,8
	P56	-20,6	-17,0	-3,2	-15,1	-17,1	-7,3	-4,1	-2,3	-4,9	-14,7
	P57	-4,6	-13,1	-6,1	-13,1	-7,3	-5,4	-3,8	-3,0	-4,2	-6,7
	P58	-6,0	-15,7	-4,3	-5,9	-6,7	-4,2	-3,6	-3,5	-3,8	-6,1
	P59	-5,4	-3,2	-4,8	-7,7	-5,6	-3,4	-3,8	-3,3	-3,5	-5,2
	P60	-4,9	-2,2	-5,8	-7,2	-5,2	-3,8	-3,4	-4,7	-3,9	-4,9
Quatre Maries - Clos de Brasinvert	P61	-7,6	-1,6	-5,1	-4,1	-6,0	-2,3	-3,7	0,0	-2,3	-5,3
	P62	-3,7	-1,8	-5,3	-7,3	-4,4	-2,5	-2,1	-3,3	-2,5	-4,1
	P63	-3,6	-2,0	-5,1	-5,3	-4,0	-1,0	-1,0	-10,0	-3,1	-3,8
Clos de Brasinvert – Rhône Vif	P64	-3,6	-1,8	-8,1	-3,7	-4,0	-1,1	-0,5	-5,7	-2,0	-3,6
	P65	-4,1	-0,6	-6,5	-0,8	-3,4	-1,8	-1,7	-1,9	-1,8	-3,1
	P66	-3,4	-1,7	-3,7	-1,9	-3,0	-2,0	-2,0	-5,9	-2,9	-3,0
	P67	-3,3	-2,1	-7,0	-1,1	-3,2	-1,8	-1,7	-4,1	-2,3	-3,0
P68	-3,3	-2,0	-4,1	-1,9	-3,0	-1,2	-1,2	-2,2	-1,4	-2,7	
P69	-4,0	-2,7	-4,0	0,5	-3,0	-1,6	-1,0	-1,7	-1,4	-2,7	

Tableau III-1 : Vitesses annuelles moyennes de d'évolution du trait de côte par secteur et par période en mètres par an (recul = négatif, avancée = positif)

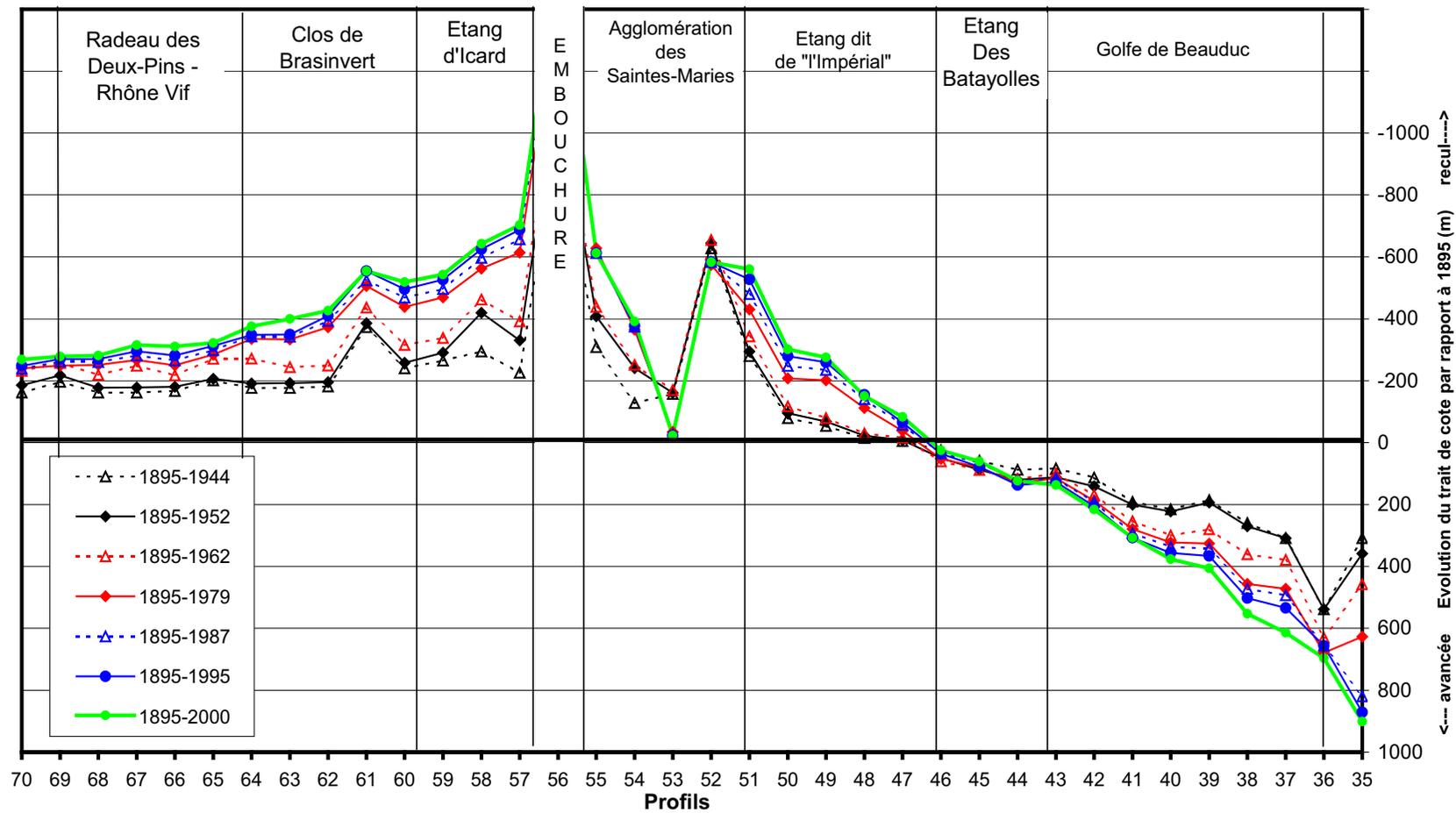


Figure III-4 : Evolution de la position du trait de côte de la commune depuis 1895 (avancée = valeur positive ; recul = valeur négative)

3.1. SECTEUR DU FOND DU GOLFE DE BEAUDUC

Ce secteur correspond à la zone de comblement à l'arrière de la pointe de Beauduc. Le trait de côte avance avec des valeurs moyennes (fig. III-5) qui augmentent d'ouest en est. Sur la période 1895-2000, les avancées du trait de côte vont de +200 m à l'ouest (P42) à +700 m à l'est (P36.)

Les décennies 1940 et 1950 présentent un ralentissement du mouvement sur la plupart des profils ($+1,9 \text{ m.an}^{-1}$), avant la reprise d'une progression rapide jusqu'à la période actuelle ($+3,2 \text{ m.an}^{-1}$, en moyenne.) Sur l'ensemble des profils la progression reste à peu près constante depuis 1895, à l'exception du profil P36 sur lequel un net ralentissement de l'avancée du trait de côte est observé depuis 1940 (+160 m) par rapport à la période 1895-1940 (+540 m).

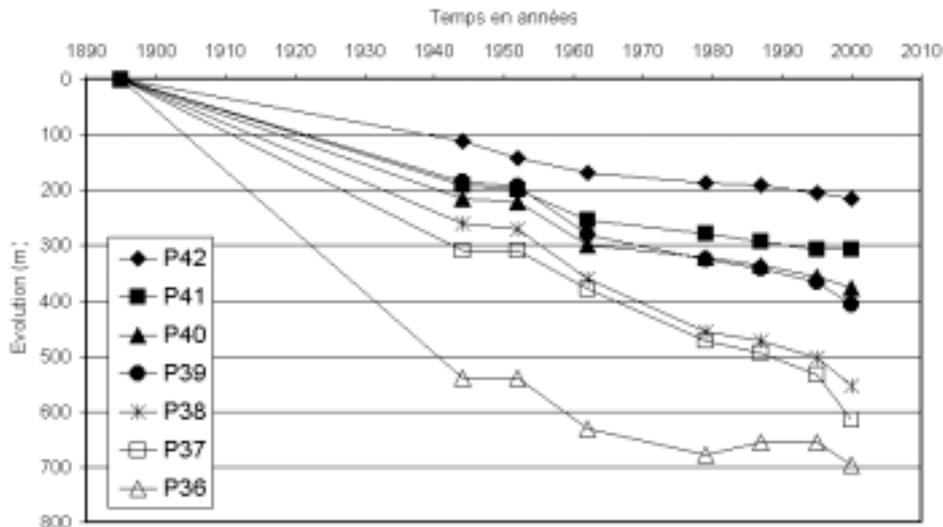


Figure III-5 : Evolution du rivage du Golfe de Beauduc

3.2. SECTEUR DE L'ETANG DES BATAYOLLES

Ce secteur correspond à une zone de transition entre secteur en érosion à l'ouest et en accrétion à l'est. Sur la période 1895-2000, les avancées sont modérées, entre 20 et 140 m (fig. III-6.)

La tendance est à l'avancée du trait de côte jusqu'en 1952 avec une évolution positive du secteur et des vitesses d'accrétion comprises entre $+2,1$ et $+0,5 \text{ m.an}^{-1}$

A la fin des années 50, la tendance s'infléchit pour les profils P45 et P46 (recul), et devient plus modérée sur les profils P43 et P44.

En 2000, les profils P46 et P45 sont quasiment revenus au niveau de 1944, et P43 et P44 ont gagné respectivement 40 et 50m.

C'est sur ce secteur que l'on rencontre le point frontière entre zone en érosion et zone en accrétion. Ce point se déplace année après année vers l'est. En 2000, il se situe entre les profils P44 et P45.

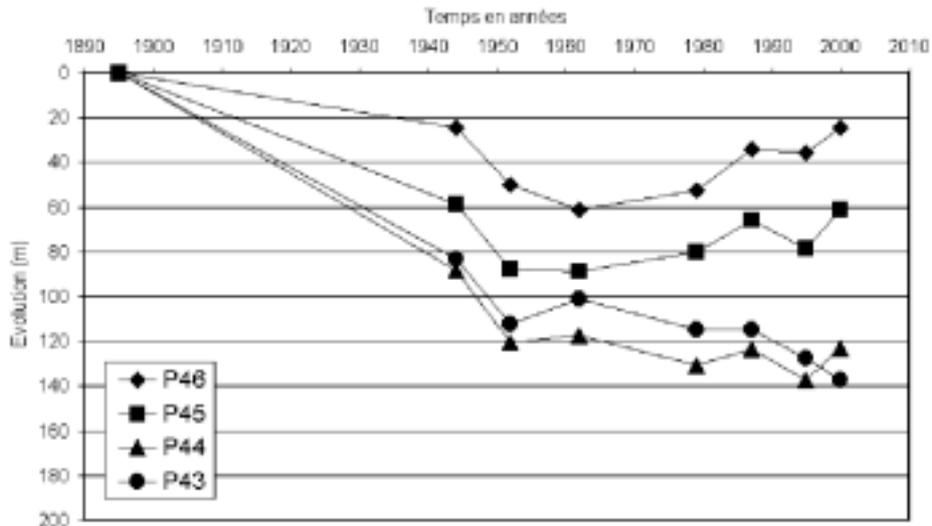


Figure III-6 : Evolution du rivage de l'étang des Batayolles

3.3. SECTEUR DE L'ETANG DE L'IMPERIAL

Ce secteur est situé à l'est immédiat de l'agglomération des Saintes-Maries-de-la-Mer. Il s'étend du Grau de la Fourcade à la limite de la Réserve Nationale de Camargue.

Le recul du trait de côte augmente à mesure que l'on se déplace vers l'ouest, des profils P47 à P51 (fig. III-7) : les vitesses les plus fortes s'observent immédiatement à l'est de l'agglomération, à l'est du Grau de la Fourcade (−300 à −270 m depuis 1895 sur P51), et diminuent régulièrement jusqu'au littoral de la Réserve où l'évolution n'est que très légèrement négative sur l'ensemble de la période (-75m.)

Les vitesses de recul sont relativement faibles jusqu'en 1962 (de −0,5 à −1,8 m.an⁻¹). Depuis les années, le recul du trait de côte s'accélère : −2,8 à −5,2 m.an⁻¹. Sur la période récente (1990-2000) le phénomène de recul se poursuit au même rythme.

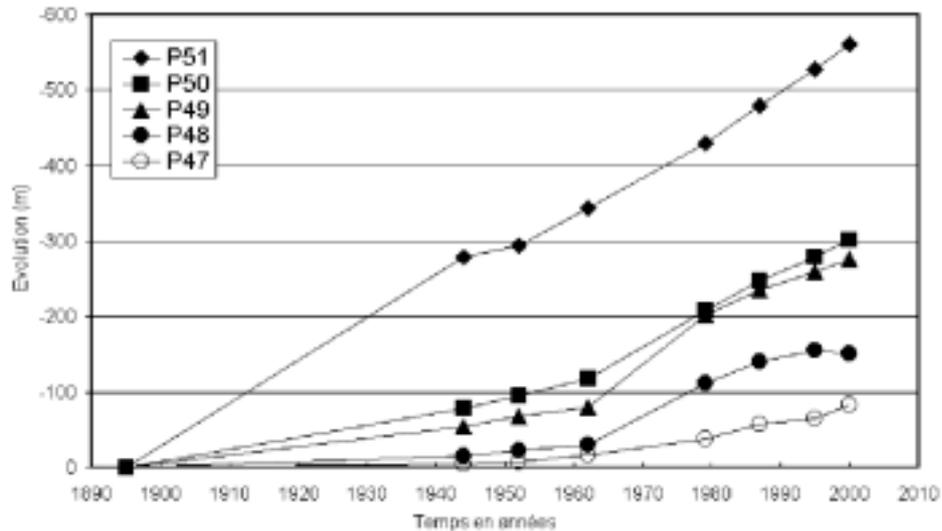


Figure III-7 : Evolution du rivage l'étang dit de « L'Impérial » (Grau de la Fourcade à la limite de la Réserve Nationale de Camargue)

3.4. SECTEUR DE L'AGGLOMERATION DES SAINTES-MARIES

Sur le secteur de l'agglomération des Saintes-Maries-de-la-Mer (3,8km de linéaire côtier.) les vitesses de recul sont très élevées (-3 à $-13,3$ m.an⁻¹) jusque dans les années 40 pour l'ensemble du secteur (fig. III-8.)

Sur la moitié est du secteur, qui correspond au village proprement dit (P52 -poste de secours est- et P53 -arènes-) le recul du trait de côte est maîtrisé dans les années 70 et le trait de côte est artificiellement reconstitué à l'aide des ouvrages implantés. Sur ces profils le trait de côte est stable jusqu'en 2000. En 2003, les observations de terrain ont montré que le trait de côte au droit du profil P52 se réduit à la digue frontale et le recul de la plage demeure à l'ouest du pertuis de la Fourcade (fig. III-9.)

Sur la moitié ouest (P54 et P55) le recul du trait de côte se poursuit jusqu'en 1979. Depuis, on assiste à une quasi-stabilité. Sur P55, le trait de côte se réduit à la digue frontale du Camping du Clos du Rhône. Sur P54 (Résidence Crin Blanc), le recul est modéré : -17 m entre 1987 et 2000, dont -15 m entre 1995 et 2000.

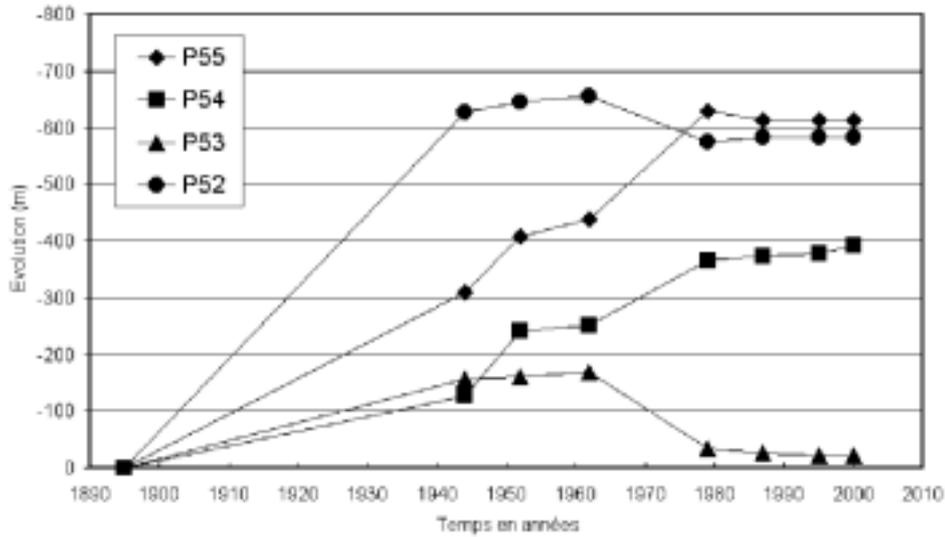


Figure III-8 : Evolution du rivage de l'agglomération des Saintes-Maries

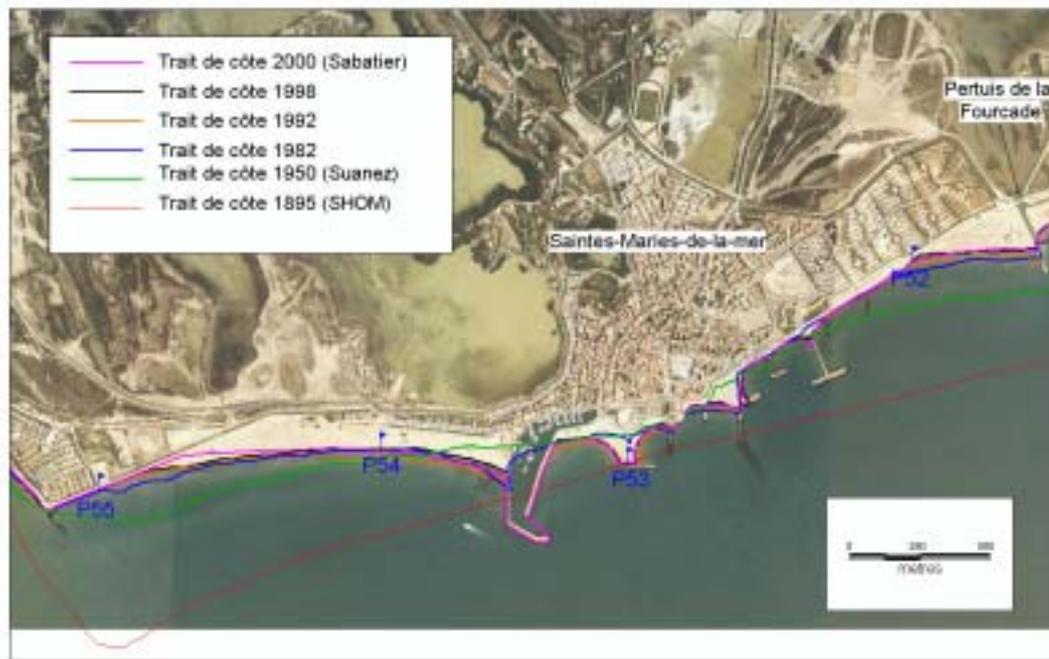


Figure III-9 : Evolution du trait de côte des Saintes-Maries-de-la-Mer depuis 1895 (fond orthophoto IGN 1998)

3.5. SECTEUR EMBOUCHURE DU PETIT RHONE - QUATRE MARIES

Les vitesses moyennes de recul du trait de côte sont supérieures à -5 m.an^{-1} (-520m sur la période). Ce recul affecte de façon assez homogène la zone qui s'étend de la rive ouest de l'embouchure du Petit Rhône aux Quatre Maries (fig. III-10.)

Au niveau de l'embouchure ouest (P57), le recul est de 700 m sur la période 1895-2000, soit -7 m.an^{-1} en moyenne, ce qui correspond à la valeur maximale mesurée sur le domaine étudié. Ces vitesses diminuent d'est en ouest. Elles sont encore de -5 m.an^{-1} à la limite entre l'étang d'Icard et les Quatre Maries (P61).

Sur les profils P59 à P61, on observe un ralentissement du recul à partir des années 40, alors que le recul s'accélère sur les profils P57 et P58. Le démantèlement plus "efficace" du delta du petit Rhône peut avoir approvisionné les plages à l'aval transit sédimentaire (P59 à P61) et donc mieux compenser les départs sédimentaires sur celles-ci.

Depuis les années 80, les vitesses de recul se stabilisent sur les profils P57, 58, 59 et 60 à une valeur proche de -4 m.an^{-1} , alors qu'en P61 le recul ne se fait plus qu'à une vitesse de -2 m.an^{-1} .

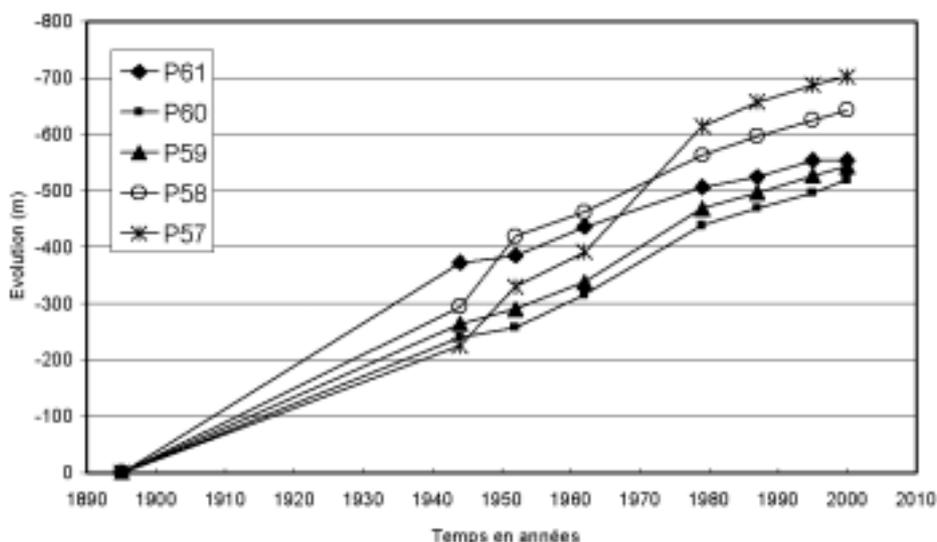


Figure III-10 : Evolution du rivage de l'Embouchure Ouest du Petit Rhône au Quatre Maries

3.6. SECTEUR QUATRE MARIES - CLOS DE BRASINVERT

Situé immédiatement à l'ouest du secteur précédent, le secteur des Quatre Maries au Clos de Brasinvert (fig. III-11) présente des valeurs de recul plus faibles, comprises entre -425m et -375m entre 1895 et 2000. Le recul est régulier depuis un siècle et les vitesses sont relativement homogènes d'un profil à l'autre mais décroissent légèrement d'est en ouest (-425m , soit -4 m.an^{-1} , à -375m , soit $-3,6 \text{ m.an}^{-1}$.)

De même que pour le secteur précédent, ces vitesses de recul diminuent à partir des années 80. Elles atteignent en moyenne -2 à -3 m.an^{-1} . Cependant, on constate que depuis 1995 l'érosion reprend activement sur les profils P63 et 64.

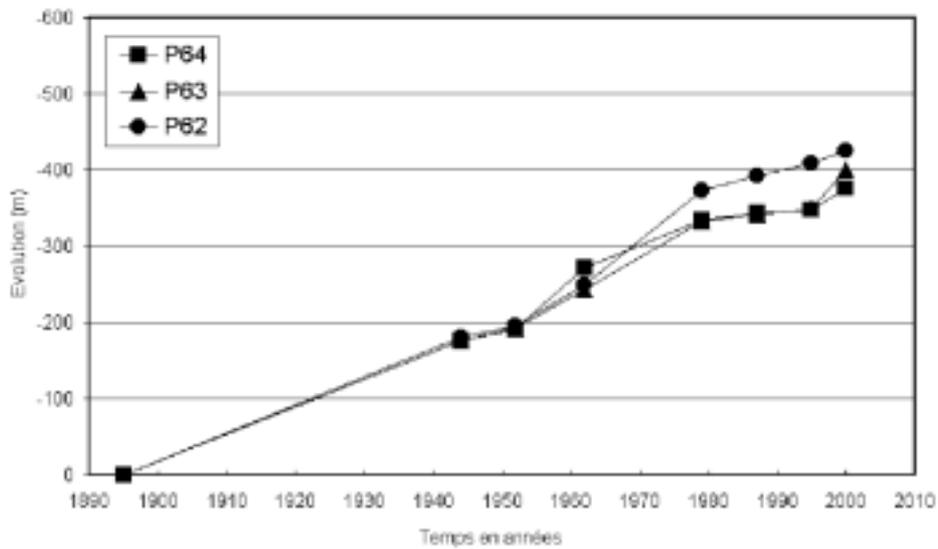


Figure III-11 : Evolution du rivage du secteur des Quatre Maries au Clos de Brasinvert

3.7. SECTEUR CLOS DE BRASINVERT - RHONE VIF

Les valeurs de recul du trait de côte entre 1895 et 2000 continuent de diminuer vers l'ouest (fig. III-12.) Sur ce secteur elles sont comprises entre -325 et -275m. Il connaît les mêmes tendances que les secteurs précédents, mais avec des vitesses d'évolution plus faibles, relativement homogènes d'un profil à l'autre. Le ralentissement de la tendance s'observe plus précocement que pour les deux secteurs précédents. Une diminution des vitesses apparaît en effet entre 1962 et 1977. Pour autant le trait de côte n'est pas stabilisé en 2000. Le recul moyen entre 1979 et 2000 reste compris entre -2,4 à -2,9 m par an.

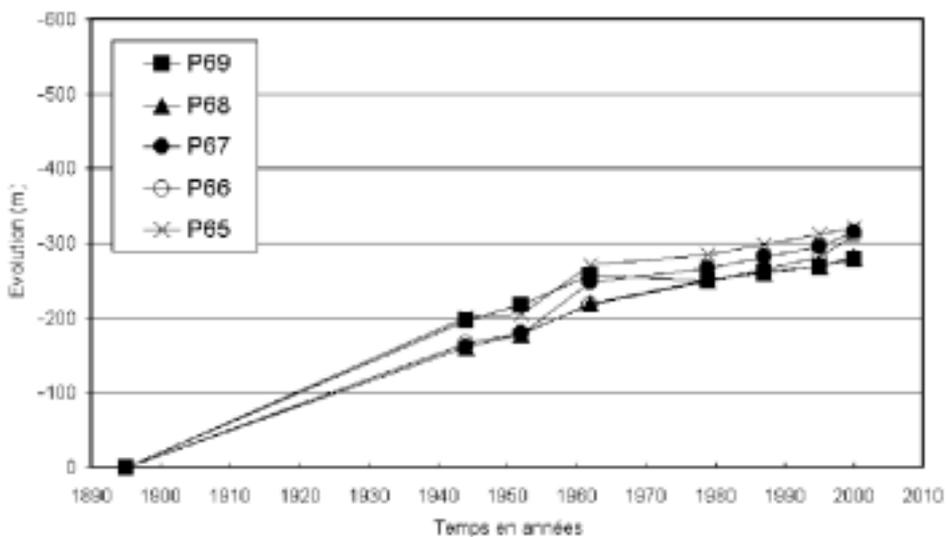


Figure III-12 : Evolution du rivage du Clos de Brasinvert au Rhône Vif

4. Synthèse des évolutions et interprétation

L'étude des vitesses de recul du trait de côte permet de mettre en évidence l'existence de plusieurs zones d'évolution différente sur le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer. D'est en ouest on distingue :

- Le fond du golfe de Beauduc qui progrède de manière régulière au cours du XX^{ème} siècle. Les vitesses d'avancée sont de plus en plus importantes d'est en ouest.
- La zone adjacente à l'ouest (littoral de l'étang des Batayolles) présente un bilan sédimentaire globalement en équilibre depuis les années 60. Ce secteur est une zone de transition entre l'ouest de la commune, en érosion, et à l'est, le golfe de Beauduc en accrétion.
- A l'est immédiat de l'agglomération, le littoral de l'étang dit « l'Impérial » qui présente un recul important (entre 560 et 75 m sur le dernier siècle) dont les valeurs augmentent fortement d'est en ouest. A partir de 1962, les vitesses de recul doublent pour tous les profils.
- Le littoral de l'agglomération des Saintes-Maries jusqu'à l'embouchure du Petit Rhône est affecté d'un recul très prononcé sur la première moitié du XX^{ème} siècle. A partir des années 50, puis des années 80, la tendance à l'érosion s'arrête : les divers ouvrages de protection contre l'érosion ont permis soit de réensabler, soit de rendre impossible le recul (digue frontale).
- La zone s'étendant entre l'embouchure du Petit Rhône et le canal du Rhône Vif (limite de la commune) est affectée par les phénomènes d'érosion les plus importants de Camargue. La zone ouest de l'embouchure du Petit Rhône présente les vitesses de recul les plus fortes, avec -800 m entre 1895 et 2000. Les vitesses de recul du trait de côte diminuent régulièrement d'est en ouest : au droit du Rhône vif, le recul global n'est plus que de -270m.

Les modalités d'évolution du trait de côte sur la commune des Saintes-Maries sont la conséquence de 2 types de facteurs :

- L'action des houles et des dynamiques météo-marines, dont la quantité d'énergie transmise à la côte varie en fonction de la bathymétrie.
- L'impact des aménagements de défense dès la seconde moitié du XX^{ème} siècle

4.1. ROLE DES HOULES

Le calcul des coefficients de réfraction (Kr en %) met en évidence l'existence de gradients géographiques dans l'application de l'énergie des houles à la côte :

Les houles de secteur SE, dominantes au large en fréquence et en intensité, présentent les Kr les plus élevés (supérieurs à 80%) pour le secteur allant des Saintes-Maries au Rhône Vif, avec un maximum au niveau du Grand Radeau (95 %.) A partir de l'est des Saintes-Maries, la divergence des orthogonales augmente, et les Kr diminuent régulièrement jusqu'au fond du Golfe de Beauduc (station de pompage où leurs valeurs sont proches de 10%) en raison du caractère abrité de cette zone due à la présence de la pointe de Beauduc.

Les houles de secteur sud, relativement faibles en terme d'énergie au large, présentent à la côte les Kr les plus élevés en raison de l'orientation du littoral, globalement

perpendiculaire à leur direction. Les valeurs sont supérieures à 90% sur un secteur s'étendant du Rhône Vif au Grau de Rousty, avec une convergence maximale au niveau de l'embouchure du Petit Rhône et de la ville des Saintes-Maries (100%.) A partir de Rousty, ces valeurs décroissent jusqu'au fond du Golfe de Beauduc, où elles sont encore de 20%. De même que pour les houles de SE, le fond du Golfe est abrité par la pointe de Beauduc.

Les houles de secteur SW, dont l'intensité et la fréquence au large sont les plus faibles, présentent des coefficients de réfraction élevés du Rhône Vif aux Saintes-Maries (90%), avec un maximum aux Saintes-Maries. La zone à l'est des Saintes-Maries présente une diminution des Kr en raison de sa situation abritée par le saillant que constitue l'embouchure et la ville. Au niveau du Grau de la Comtesse, les Kr sont de nouveau maximums (100%) puis diminuent jusqu'à atteindre 40% au fond du Golfe de Beauduc (station de pompage.)

Ce zonage des coefficients de réfraction en fonction des secteurs de houle permet d'expliquer les différences observées dans les vitesses de recul des secteurs discrétisés. On constate en effet que les secteurs présentant les plus fortes vitesses de recul (Embouchure du Petit Rhône au Rhône Vif) correspondent aux portions du littoral possédant les coefficients de réfraction les plus élevés : de l'embouchure du Petit Rhône au Grand Radeau, les Kr sont supérieurs à 90% pour tous les secteurs de houles incidentes. L'embouchure, les Saintes-Maries et le Grand Radeau cumulent de plus les taux les plus élevés pour ces directions. Ces coefficients diminuent légèrement du Grand Radeau au Rhône Vif, mais ne sont jamais inférieurs à 80%. Le secteur littoral de l'étang des Batayolles, à l'est de la ville, présente également des vitesses de recul élevées, diminuant fortement d'ouest en est. Cette réduction des vitesses est à mettre en relation avec les Kr des houles de sud-est, qui suivent la même évolution sur cette section du littoral, alors que les Kr des secteurs sud et sud-ouest augmentent dans cette direction.

La « zone neutre » stable (littoral de l'étang de « l'Impérial ») située à l'est du Pont de Rousty correspond à des Kr pour des houles de sud-est faibles (inférieurs à 40%), décroissant vers l'est, alors que les houles de Sud et surtout de sud-ouest présentent encore des Kr très élevés (supérieurs à 90%.)

Le secteur du Golfe de Beauduc, en accréation, est caractérisé par les Kr les plus faibles pour les trois secteurs. (S-E<20%, S<40%, S-W<60%.)

Ce zonage illustre l'influence dominante des houles de sud-est dans l'évolution du trait de côte, élément déterminant pour l'intensité et la direction du transit sédimentaire et l'évolution du littoral de la commune des Saintes-Maries.

4.2. IMPACT DES AMENAGEMENTS SUR LES VITESSES DE REcul

Au cours de la période, les vitesses de recul calculées entre chaque date présentent des variations pour plusieurs secteurs. Dans la seconde moitié du XXème siècle, ces gradients peuvent s'expliquer par la mise en place des aménagements destinés à protéger le littoral. L'impact de ces aménagements est perceptible sur tous les

secteurs, à l'exception du Golfe de Beauduc. Leur influence est évaluée par l'étude des vitesses de recul mesurées sur les profils.

4.2.1. Le littoral de l'étang dit de « L'Impérial »

Ce secteur (fig. III-13) ne présente pas d'aménagements destinés à fixer de manière rigide le trait de côte, cependant, son évolution peut être rapprochée de celle du secteur adjacent de la ville des Saintes-Maries. De 1895 à 1962, les vitesses de recul de chaque profil sont constantes d'une période à l'autre. De 1962 à nos jours, elles sont toutes multipliées par 2,5. Or, la période de 1962 à nos jours correspond à la phase d'aménagement lourde du littoral de l'agglomération des Saintes-Maries. Il semble donc que l'accélération des vitesses de recul mesurée à l'est de la ville ait été induite par les équipements.

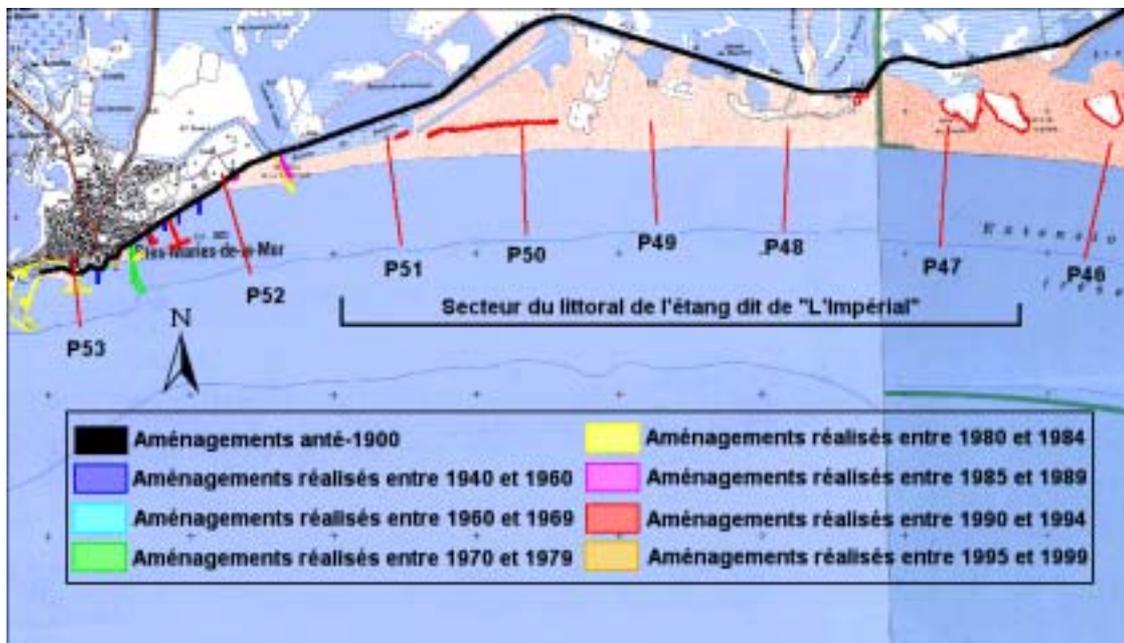


Figure III-13 : Aménagements littoraux du secteur de «L'Impérial » et profils de calculs associés.

4.2.2. L'agglomération des Saintes-Maries-de-la-Mer

Les tendances et vitesses observées sur ce secteur (fig. III-14) sont extrêmement variables d'une période et d'un profil à l'autre. La période 1944-1952 correspond à une accélération des vitesses de recul pour les profils P55 (embouchure est) et P54 (plage ouest), alors que dans la même période, P53 (arènes) et P52 (Plage est) montrent un fort ralentissement de l'érosion. Ce phénomène peut s'expliquer par la construction des premiers équipements de protection des Saintes-Maries (épis orientés nord-sud), précisément au droit des arènes et de la plage est. La diminution du transit de matériel par la dérive littorale (de direction est-ouest dominante dans ce secteur, Sabatier, 2001), bloquée par les épis, et le déficit concomitant des apports au niveau de la plage ouest et de l'embouchure peut alors expliquer l'accélération des vitesses de recul pour les deux profils occidentaux.

La période suivante (1952-1962) correspond à une diminution des vitesses de recul des profils P55 et P54, qui se calquent sur celles de P52 et P53. Aucun aménagement n'est effectué sur le littoral durant cette période. Le ralentissement des vitesses de P54 et P55 peut s'expliquer par une adaptation de la bathymétrie au nouveau contexte de diminution des apports.

La période de 1962 à 1987 correspond à une forte reprise de l'érosion sur P55 et P54, alors que P53 et P52 présentent dans le même temps une reprise de l'accrétion. Cet intervalle temporel correspond en fait à la phase d'aménagement la plus importante des Saintes-Maries, durant laquelle sont construits le grand épis est, l'épis ouest du Grau de la Fourcade, le port de la ville, l'épis en T des Arènes et les digues de l'embouchure. L'accrétion des profils P53 et P52 est donc artificiellement provoquée par la construction des équipements. Parallèlement, l'érosion se reporte sur le secteur ouest de la ville (P55 et P54), non-équipé.

La période de 1987 à nos jours est caractérisée par une tendance au ralentissement des mouvements pour tous les profils : les aménagements se poursuivent sur l'ensemble du littoral de la ville, dont le trait de côte est entièrement artificialisé (digue frontale, épi en T du centre de thalasso-thérapie, épi est du Grau de la Fourcade, tenon du Grand épi est.) Seul P54 (Plage ouest) présente encore une faible tendance au recul.

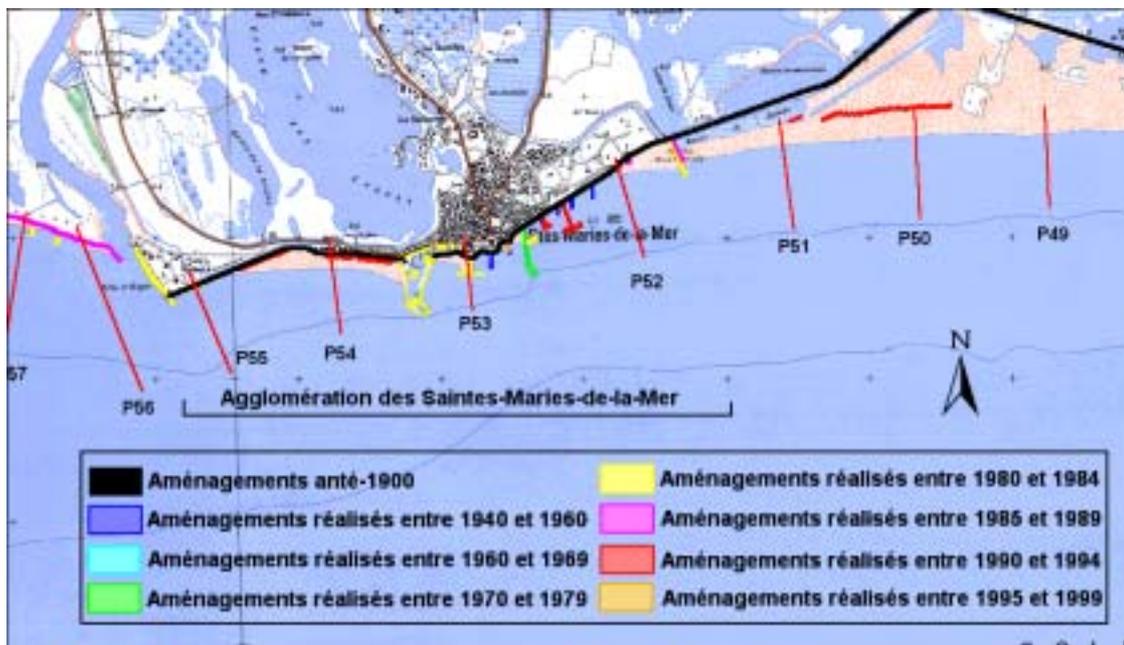


Figure III-14 : Aménagements littoraux de l'agglomération des saintes-Maries et profils de calculs associés.

4.2.3. De l'embouchure du Petit Rhône au Clos de Brasinvert

Ils présentent des vitesses de recul relativement constantes, jusqu'à la période 1979-1986, à partir de laquelle les vitesses diminuent. De même que pour le secteur précédent, cette période correspond à la construction d'épis sur l'ensemble du littoral de Petite Camargue (fig. III-15.) La période 1995-2000 correspond également à une reprise de l'érosion sur ces deux secteurs.

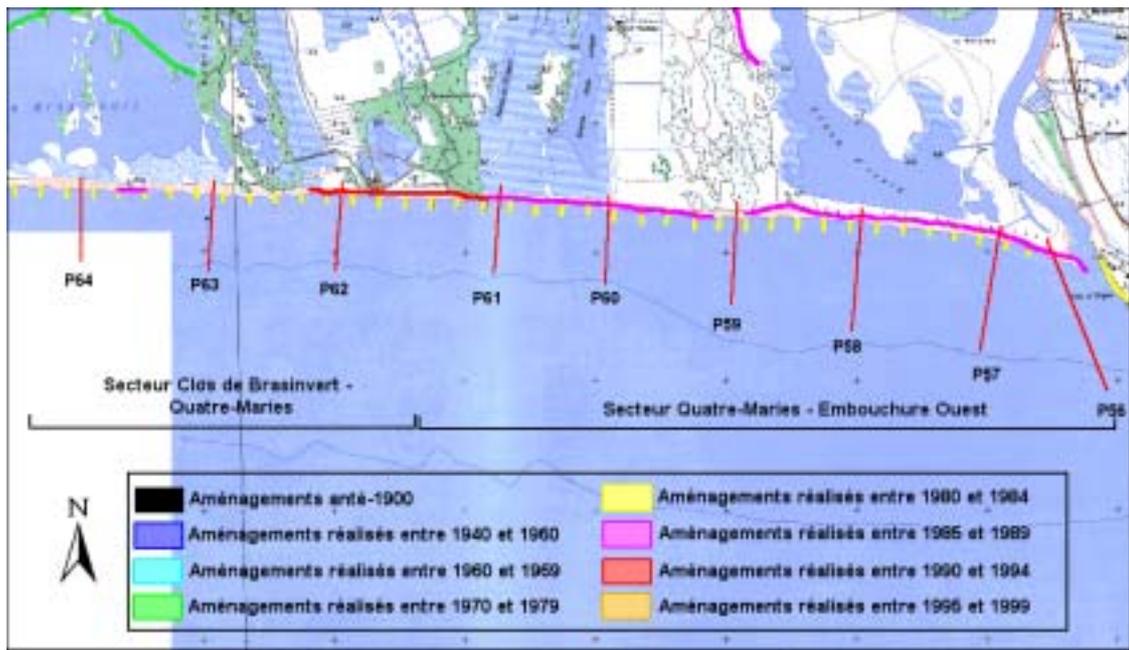


Figure III-15 : Aménagements littoraux du Clos de Brasinvert à l'embouchure du Petit Rhône et profils de calculs associés.

4.2.4. Du Clos de Brasinvert au Rhône Vif

La tendance au ralentissement du recul des profils P65 et P69 débute dès 1944-1954 pour P65, et diminue ou s'inverse entre 1962 et 1979 pour les deux. Ces périodes correspondent à la construction des prises d'eau 1 et 2 des Salins -situées à proximité immédiate des profils- en 1952 (P65) et 1961 (P69.) Ces aménagements (fig. III-16) sont équipés d'épis de protection entre 1962 et 1963. A partir de la période 1979-1986, on observe une diminution des vitesses de recul sur l'ensemble des transects. Cette diminution peut s'expliquer par la construction des épis de Petite Camargue, entre 1984 et 1986. Ces aménagements semblent efficaces jusqu'à la période 1995-2000, qui correspond à une accélération de l'érosion sur l'ensemble du secteur.

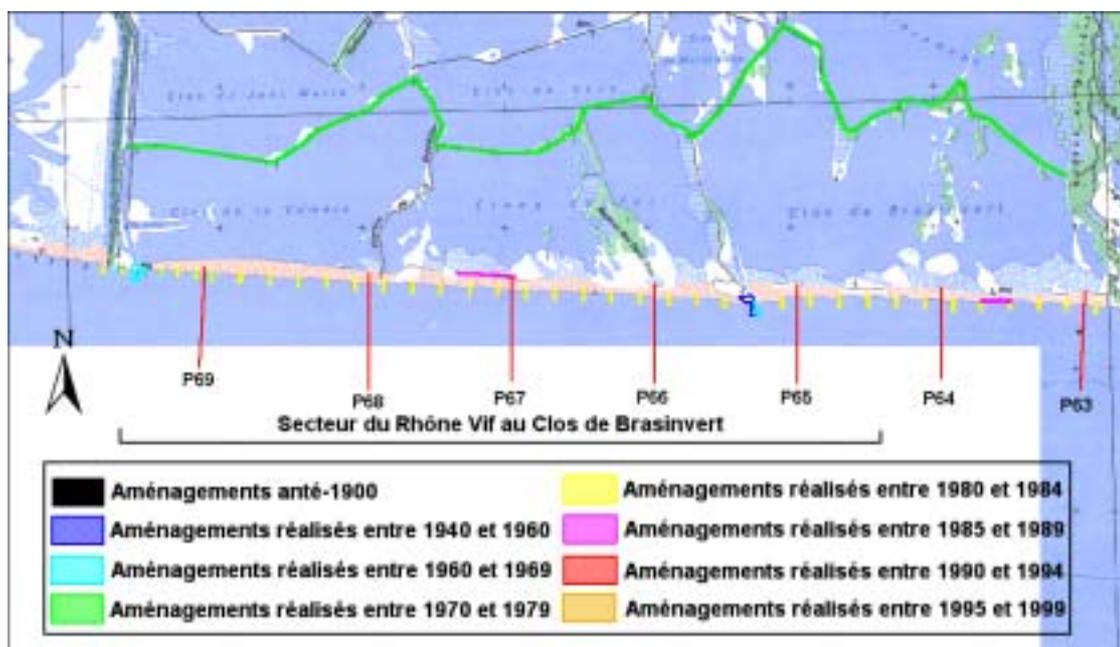


Figure III-16 : Aménagements littoraux du Rhône Vif au Clos de Brasinvert et profils de calculs associés.

5. Conclusion

Le comportement général du littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer est caractérisé par la tendance au recul de près de 54% (18,59Km) de son linéaire côtier. Les secteurs naturellement stables et en accrétion ne représentent que 34% (12,5Km) de la côte.

L'étude des vitesses de recul calculées par périodes permet de mettre en évidence l'existence de secteurs aux comportements sédimentaires hétérogènes. Ces comportements sont dus d'une part à l'orientation et à la bathymétrie du littoral ainsi qu'à la présence de la Pointe de Beauduc, déterminants l'impact des houles à la côte, d'autre part à la mise en place d'équipements : les secteurs aménagés présentent des ralentissements de l'érosion, voir un reprise artificielle de l'accrétion, cependant que les zones non-équipées situées en aval-dérive semblent affectées d'une accélération de l'érosion correspondant aux périodes d'aménagement des zones amont-dérive.

Enfin, certains secteurs n'évoluent plus, contraints par la présence de digues frontales les "pieds dans l'eau".

PARTIE IV : MODE LISATIONS

1. Modélisation morphodynamique

1.1. INTRODUCTION

L'objectif de ces travaux est d'étudier la faisabilité de la modélisation de l'évolution d'un profil de plage au cours d'une tempête à l'aide du logiciel SBEACH. Cette étude correspond à la tâche T 7.5 du projet et constitue une étape importante du projet car, en fonction des résultats obtenus, on pourra statuer sur l'utilisation de SBEACH pour simuler le comportement de profils types de plage pour des situations de référence.

Nous allons tout d'abord décrire la méthode retenue pour modéliser l'évolution d'un profil de plage à court terme, notamment le logiciel qui a été utilisé SBEACH, ainsi que les données d'entrée nécessaires. Puis nous décrirons les essais de modélisation faits sur les profils de Rousty en terme de données d'entrée, de résultats obtenus et d'analyse de ces résultats. Nous pourrions ainsi conclure sur la pertinence de l'utilisation de SBEACH pour cette thématique.

1.2. LA METHODE UTILISEE

Pour modéliser l'évolution d'un profil de plage sous l'action d'une tempête, nous avons retenu le logiciel SBEACH car il constitue l'un des logiciels les plus utilisés pour cette problématique. Nous allons décrire plus en détail le principe de ce logiciel ainsi que les données nécessaires à son utilisation.

1.2.1. Le logiciel SBEACH

SBEACH est un modèle numérique créé par le CERC (Coastal Engineering Research Center) du WES (Waterways Experiment Station, US Army Corps of Engineers). C'est un logiciel très largement utilisé, notamment aux Etats-Unis, pour étudier les effets des tempêtes et le suivi des rechargements de plage.

Comme son nom l'indique, SBEACH (pour Storm-induced BEAch CHange) a été créé pour modéliser l'évolution 2D de profils de plage cross-shore (perpendiculaire à la côte) essentiellement sous l'action des tempêtes. En effet, comme il néglige le transport longshore (parallèle à la côte) et les courants, il ne peut pas être employé pour simuler des changements de profils sur une échelle de temps trop importante. Pour ces mêmes raisons, il ne peut pas être utilisé à proximité de structures anthropiques ou pour étudier leur impact (Rosati et al., 1993). Le transport sédimentaire et les changements de profil induits sont gouvernés essentiellement par le déferlement des vagues et les variations de hauteur d'eau (provenant des tempêtes, de la marée et du vent). SBEACH permet donc de simuler l'évolution d'un profil de plage, notamment la formation et le mouvement des barres subtidales.

Ce modèle est basé sur des relations empiriques obtenues lors d'essais dans des canaux à houle (LWT : Large Wave Tank) au Japon et aux Etats-Unis dans les années 50, 60 et 80. Des données in situ recueillies sur les plages américaines ont ensuite permis d'affiner le modèle. Le profil est séparé en 4 zones et chacune d'elles est

associée à une formule empirique de transport correspondant aux phénomènes prépondérants dans la zone.

Pour cette étude, nous nous sommes servi de l'interface SBEACH-32 Version 2.0 datant de 1996. Elle correspond à la version MS-DOS 3.0 à laquelle ont été rajoutées deux options (Sommerfeld et al., 1996) : un fond dur peut être inclus au profil et le sable peut sortir du domaine (le volume de sable n'est donc pas forcément constant).

1.2.2. Les données d'entrée

Les données d'entrée nécessaires au fonctionnement de SBEACH sont de trois types : le profil initial, les caractéristiques des éléments de forçage (houle, vent, marée), différents paramètres physiques et empiriques.

- Le profil initial

Le profil initial est défini par une courbe rentrée par l'utilisateur. Il est nécessaire de renseigner un certain nombre de caractéristiques liées à ce profil : elles sont décrites dans le paragraphe qui traite de tous les paramètres physiques et empiriques.

- Les éléments de forçage

En plus des informations générales, il est nécessaire de rentrer des données sur la houle, le vent et la hauteur d'eau :

Les caractéristiques générales : SBEACH a besoin de savoir à quelle profondeur l'utilisateur définit la houle (on peut rentrer n'importe quelle valeur jusqu'à « houle au large »). On peut également choisir entre une houle monochromatique ou irrégulière et enfin le pas de temps de calcul doit être précisé.

La houle : les données de houle nécessaires sont la période, la hauteur et la direction. A chaque fois, il est possible de rentrer une constante ou bien une courbe. *Les directions sont entrées en utilisant la convention suivante : 0° pour une houle perpendiculaire à la côte ; +/- 90° pour une houle parallèle à la côte (-) lorsqu'elle provient de la droite d'un observateur placé sur la plage et regardant la mer, (+) lorsqu'elle provient de la gauche.*

Le vent : SBEACH a besoin de la vitesse et de la direction du vent. Comme pour la houle, il peut s'agir d'une courbe ou d'une constante.

Le niveau d'eau : il correspond aux variations dues à la marée et aux surcotes ou décotes ; il peut également être une constante ou une courbe.

- Les paramètres physiques, empiriques et numériques

Les informations à rentrer dans SBEACH sont de plusieurs types (physiques, empiriques et numériques) et concernent trois grands domaines : le profil, le transport et la grille de calcul (Sommerfeld et al., 1996).

Le profil :

- *Profondeur de la zone de surf*. Elle sert à séparer la zone de surf de la zone de swash où les phénomènes sont différents et donc les formules de transport également.
- *Granulométrie moyenne de la plage*. La granulométrie de la plupart des plages n'est pas homogène : en général, la taille des grains diminuent quand la profondeur augmente. SBEACH ne prenant pas en compte ces différences, il faut donc préciser une valeur moyenne pour l'ensemble du profil. Comme dans ce modèle l'érosion est essentiellement induite par les processus de transport dans la zone de surf, la granulométrie moyenne de la zone de surf est probablement la plus représentative (sauf en cas d'un rechargement de plage).
- *Pente maximale avant avalanche*. Comprise entre 15 et 30°, cette valeur correspond à la pente limite qui peut être obtenue sur le profil. A chaque fin de pas de temps, si cette valeur est dépassée, il y a une avalanche et la pente résultante est inférieure de 10° par rapport à sa valeur précédente.
- *Présence ou non d'une digue frontale*. Elle est définie par sa position et par les conditions qui entraînent sa rupture (élévation du profil, niveau d'eau, hauteur de houle).
- *Possibilité d'inclure un fond dur* caractérisé par un paramètre empirique lié au transport.

Le transport :

- *Taux de transport K*. C'est le paramètre le plus important de la calibration du modèle et le plus difficile à évaluer car il est totalement empirique et donc ne repose sur aucune données locales. Il intervient dans les calculs de flux de transport sédimentaire et la valeur conseillée par défaut pour commencer les essais est $1.75 \cdot 10^{-6} \text{ m}^4/\text{N}$. Plus K est grand, plus les flux sédimentaires sont forts et plus la taille des barres est importante.
- *Coefficient de pente Eps*. Il précise si les barres sont plus ou moins raides : plus Eps est faible, plus le creux est fort et donc plus les profils des barres sont raides.
- *Facteur d'affaiblissement du taux de transport LAMM*. Il concerne la partie offshore de la simulation et contrôle la forme des barres : une valeur importante de LAMM entraîne des barres étroites et pointues. Cette valeur peut varier de 0.1 à 0.5 avec une valeur par défaut à 0.5 recommandée pour les essais.
- *Température de l'eau*. Elle est utilisée pour calculer la vitesse de chute des sédiments et peut varier entre 0 et 40°C.
- On peut préciser si le sable doit rester dans le domaine défini par la taille de la grille de calcul où s'il peut en sortir.

La grille de calcul : il faut préciser la taille et le nombre de cellules de calcul. Plus la zone est intéressante pour l'étude, plus la grille doit être fine donc les cellules petites et nombreuses. Ces paramètres permettent de déterminer indirectement l'étendue cross-shore de la simulation et jouent un rôle très important sur les résultats obtenus. Ils font donc partie des paramètres clés de la modélisation sur SBEACH. De plus, ils doivent être compatibles avec le pas de temps de calcul : en effet, le pas

de temps utilisé doit correspondre à la plus petite taille de cellule (une cellule de 3 à 6 m correspond à un pas de temps de 5 à 10 min).

SBEACH nécessite donc la connaissance d'un nombre important de paramètres et surtout de caler plusieurs coefficients empiriques ce qui complique son utilisation et la calibration globale du modèle.

1.3. LES ESSAIS SUR LES PROFILS DE ROUSTY

La pertinence de l'utilisation de SBEACH pour modéliser l'évolution court terme d'un profil de plage a été étudiée grâce à des mesures faites sur la plage de Rousty. Nous allons donc décrire les données utilisées, les essais proprement dits et les résultats obtenus. Ces résultats seront ensuite analysés et discutés.

1.3.1. Les données d'entrée communes à chaque essai : le profil initial et les éléments de forçage

Le profil initial utilisé a été levé par le CEREGE le 4 octobre 2000. Les résultats obtenus avec SBEACH seront comparés à un autre profil levé par le CEREGE le 17 octobre 2000 (fig. IV-1).

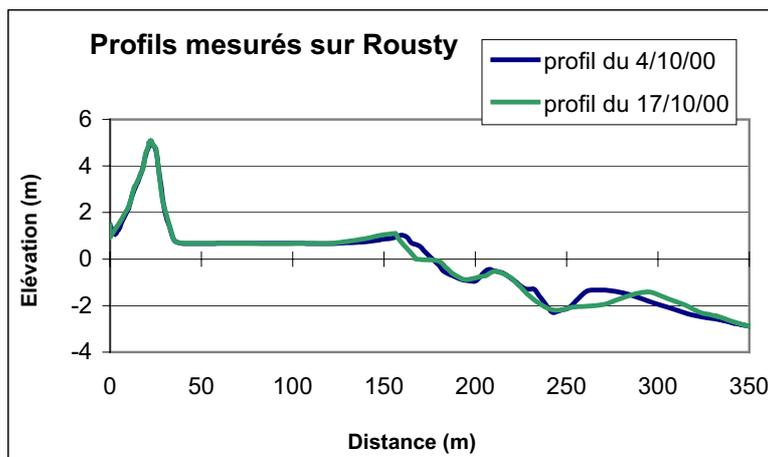


Figure IV-1 : Profils levés par le CEREGE sur la plage de Rousty les 4 et 17/10/2000.

Les éléments de forçage couvrent donc la période du 4 au 17 octobre 2000. Les données de houle proviennent de la bouée du Golfe de Beauduc gérée par le CETMEF (fig. IV-2 et fig. IV-3). C'est une Datawell directionnelle située par -17 m de fond. Les données anémométriques sont issues de la station de Port-Guardian gérée par Météo-France (fig. IV-3 et fig. IV-4). Les directions de houle et des vents ont été recalculées pour répondre aux conventions utilisées par SBEACH (par exemple -45° pour une houle de SW, 0° pour S et $+45^\circ$ pour SE)

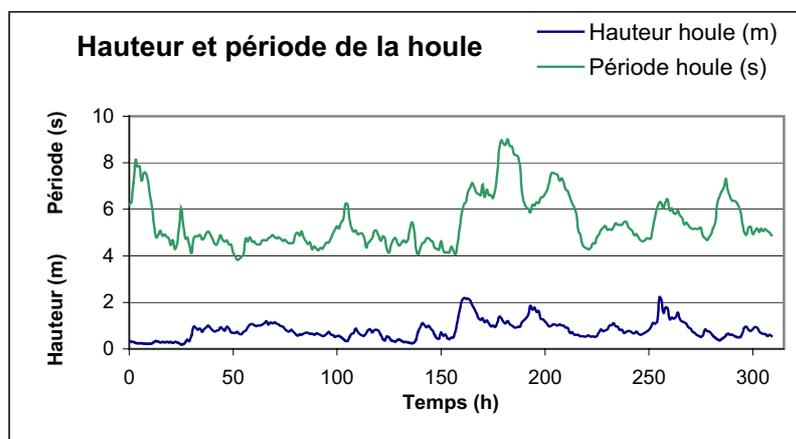


Figure IV-2 : Hauteur et période de houle obtenues à partir de la bouée du Golfe de Beauduc

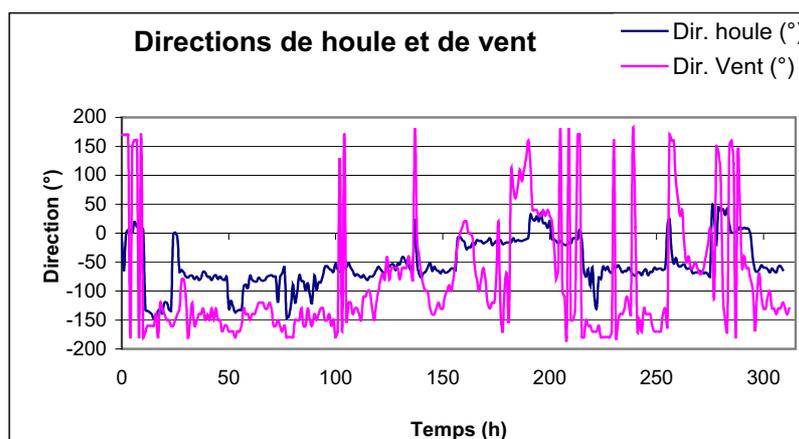


Figure IV-3 : Directions de la houle obtenues à partir de la bouée du Golfe de Beauduc et du vent obtenues à la station de Port-Guardian (recalculées selon la convention SBEACH).

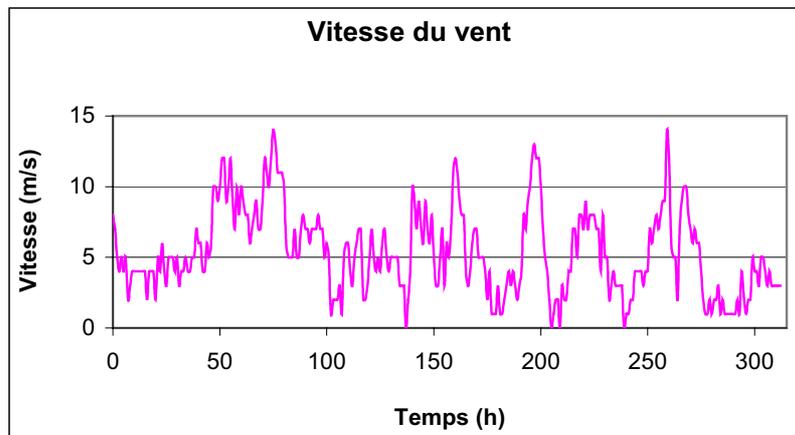


Figure IV-4 : Vitesses du vent obtenues à la station de Port-Guardian.

1.3.2. Les essais et les résultats obtenus

Pour mener à bien ces essais, nous avons donc utilisé les éléments de forçage présentés dans le paragraphe précédent et nous avons essayé de choisir au mieux les paramètres empiriques et numériques pour caler le modèle. L'influence de tous les paramètres présentés au paragraphe 2.2.3, auxquels il faut ajouter la « randomisation » des houles, ont été testés. Mais une attention particulière a été portée aux paramètres les plus influents à savoir le taux de transport K, les caractéristiques de la grille de calcul et la profondeur de la zone de surf.

La problématique du risque de submersion portant essentiellement sur la partie supérieure du profil (dune et berme) et non sur les barres subditaes, nous avons essayé d'obtenir un profil modélisé le plus proche possible du profil mesuré dans la partie supérieure, le tout dans la limite de variation des différents paramètres. Pour estimer le « meilleur » profil, nous avons utilisé plusieurs approches :

- soit en utilisant le paramètre $R = \frac{1}{i} \sum (x_i^m - x_i^r)^2$ avec x_i^m les points du profil modélisé avec SBEACH et x_i^r les points du profil réel donc mesuré in situ. Plus R est faible, plus le profil modélisé est « proche » du profil réel.
- soit visuellement en zoomant sur la partie supérieure.

La première méthode a l'avantage d'optimiser un paramètre sans subjectivité mais la deuxième méthode permet à l'opérateur d'apprécier des subtilités que le calcul répétitif ne permet pas de mettre en lumière. En effet, un profil modélisé peut sembler éloigné du profil mesuré (i.e. R relativement grand) mais se révéler plus satisfaisant qu'un autre car le profil est au plus proche dans les zones de fort intérêt et plus éloigné dans les zones qui nous intéressent moins. Dans la mesure du possible, nous avons essayé de coupler ces deux approches complémentaires, mais cela ne se révélait pas indispensable dans tous les cas. Sur ces bases, nous avons retenu un essai, appelé « essai10 », comme étant le « meilleur » obtenu.

Les paramètres physiques, empiriques et numériques correspondants sont :

- grille : 100 cellules de 2.5 m de large suivies de 150 cellules de 5 m.
- profondeur de la zone de surf : 0.02 m
- granulométrie moyenne de la plage : 0.2 mm
- pente maximale avant avalanche : 28°
- pas de digue à la mer
- pas de fond dur
- taux de transport K : $3.10^{-7} \text{ m}^4/\text{N}$
- coefficient de pente Eps : 0.001
- facteur d'affaiblissement du taux de transport LAMM : 0.17
- température de l'eau : 20°C
- « randomisation » des houles : 4567 en valeur initiale et 20% de variabilité (valeurs par défaut)
- niveau d'eau constant égal à 0.2 m

Les résultats correspondants sont présentés sur les figures suivantes (fig. IV-5 et fig. IV-6).

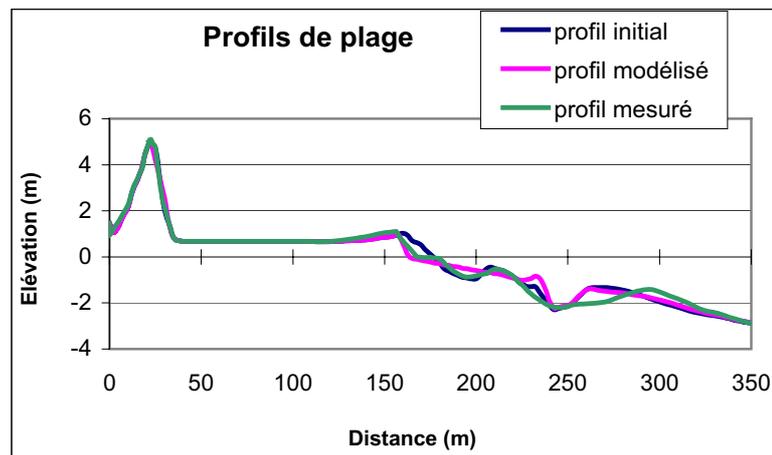


Figure IV-5 : Comparaison des résultats avec les profils initial et mesuré in situ (essai10).

Sur l'ensemble du profil (fig. IV-5), le résultat obtenu avec SBEACH n'est pas très satisfaisant par rapport aux mesures faites in situ. La différence est surtout importante pour les barres subtidales. Cela n'est pas très étonnant car, de part notre problématique, nous nous sommes attachés à l'étude de la partie supérieure du profil et il est relativement difficile de modéliser avec SBEACH correctement et en même temps la partie supérieure et les barres subtidales. Si on fait donc abstraction de la partie inférieure du profil, qui ne nous intéresse pas, la figure 5 montre un accord relativement bon sur la partie supérieure du profil (dune + berme).

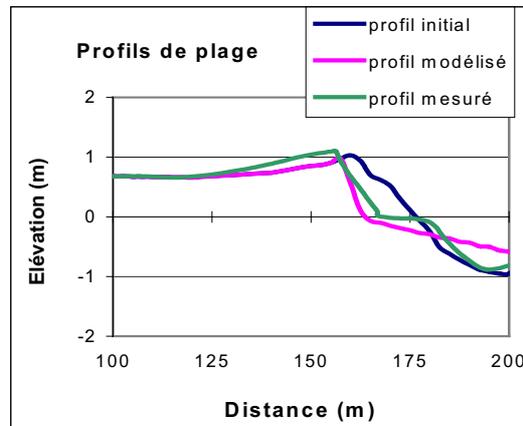


Figure IV-6 : Gros plan sur la berme du graphique de la figure IV-5.

Dans la partie supérieure, le point le plus critique de la modélisation et le plus important pour cette étude est la modélisation de la berme. La figure 6 présente donc un zoom du graphique de la figure 5 sur cette zone. Deux points apparaissent clairement : d'une part le recul de la plage est bien estimé (cf. position en x en haut de berme des profils modélisé et mesuré par rapport au profil initial), mais d'autre part la forme de la berme ne correspond pas exactement à celle mesurée. Notamment, on peut noter que l'accrétion visible derrière la berme n'est pas du tout rendue. Nous allons voir dans le paragraphe suivant les explications possibles de ces résultats quelque peu décevants.

1.3.3. Les explications possibles

Comme tout modèle numérique basé sur des relations empiriques et des approximations nécessaires au calcul, SBEACH ne peut pas modéliser parfaitement les phénomènes. Ses créateurs sont tout à fait conscients de ses limites et cela apparaît très bien dans les différents manuels d'utilisation et d'explication relatifs au logiciel. L'accrétion de la berme, par exemple, qui est le phénomène le plus pénalisant pour notre étude, est largement abordée dans ces documents car elle constitue un des points faibles avoués de SBEACH. On peut également remarquer que de plus en plus de personnes mettent en garde contre l'utilisation de logiciels largement répandus comme SBEACH sans faire attention à toutes les approximations que cela implique (Thieler et al., 2000).

Concernant notre étude, un certain nombre de raisons sont probablement à l'origine des résultats un peu décevants obtenus : certaines dues à nos données, d'autres à la construction même de SBEACH ou aux approximations faites.

Tout d'abord, la durée de modélisation est probablement trop longue. En effet, les deux profils mesurés in situ (les 4 et 17/10/00) sont espacés de 13 jours. Or SBEACH a été créé pour modéliser des tempêtes sur une durée d'environ 1 à 3 jours. Ce point est relativement important car plus le laps de temps modélisé est long, plus certaines hypothèses se révèlent incorrectes notamment le fait de négliger le transport longshore (parallèle à la côte). De plus, SBEACH n'étant pas capable de modéliser

l'accrétion sur la berme qui se produit après une tempête, si le profil est levé ne serait-ce que quelques jours après la tempête, il ne pourra pas y avoir accord entre les profils modélisé et mesuré sur ce point (Rosati et al., 1993). C'est probablement ce qui explique en partie les résultats présentés précédemment. Il faut cependant signaler qu'il n'est pas facile d'avoir à disposition des profils juste avant et juste après une tempête.

De plus, un certain nombre d'imprécisions peuvent également venir de la construction même de SBEACH. En effet, il a déjà été précisé que SBEACH modélise mal les phénomènes d'accrétion. Cela est en partie dû au fait qu'il se base sur une relation empirique calée sur des essais en LWT (Large Wave Tank) :

- si $\frac{H_0}{L_0} > 0.0007 \left(\frac{H_0}{T w} \right)^3$, il y a transport vers le large donc érosion
- si $\frac{H_0}{L_0} < 0.0007 \left(\frac{H_0}{T w} \right)^3$, il y a transport vers la côte donc accrétion

avec H_0 et L_0 les hauteurs et longueur d'onde de la houle au large, w la vitesse de chute du sédiment caractéristique et T la période de la houle.

Il semble que cette formule ne soit pas bien adaptée (ou le paramètre $M=0.0007$ mal calé) pour des utilisations sur des profils réels et non plus en laboratoire. Les responsables de SBEACH précisent que la prise en compte de l'accrétion notamment sur la berme est un des points à améliorer en priorité (Larson et al., 1990).

Parmi les imprécisions inhérentes à l'utilisation de SBEACH, on peut noter également que le nombre important de paramètres physiques et empiriques à renseigner, et dont l'utilisateur ne connaît pas la valeur a priori, peut être source d'erreurs. Enfin, il ne faut pas oublier que ce logiciel a été calé sur des expériences en canaux à houle et sur des côtes américaines. On peut donc légitimement se poser la question de son utilisation (sans apporter de modification aux formules) sur les côtes françaises. En effet, des phénomènes prépondérants sur un type de plage peuvent se trouver négligeables sur d'autres.

Enfin, SBEACH se base sur plusieurs approximations pour simplifier l'approche des phénomènes complexes et les calculs (Thieler et al., 2000 ; Larson et al., 1990 ; Schreiber, 1999). Certaines jouent probablement un rôle non négligeable dans les imprécisions obtenues :

- Les phénomènes d'overwash (importants pour les risques de submersion), de transport éolien (non négligeable dans cette région) et les caractéristiques des dunes (végétation, pente, largeur, trouées d'overwash...) ne sont pas pris en compte.
- C'est la théorie linéaire de la houle qui est utilisée. La houle est représentée par une sinusoïde donc symétrique ce qui apporte une grossière approximation en terme de transport.
- Comme dans la quasi totalité des modèles, on ne tient pas compte des ondes infragravitaires qui sont des ondes de longue période (la gamme dans SBEACH est $T \sim 3$ à 20 s.). De plus en plus, il apparaît que ces ondes jouent un rôle prépondérant dans les phénomènes de transport proches de la côte ainsi que dans la formation des barres.

- SBEACH se base sur la notion de profil d'équilibre comme de nombreux autres modèles. Cela signifie qu'un profil se mettra à l'équilibre s'il est soumis à un climat de houle constant. Or cette notion est de plus en plus critiquée car elle s'appuie notamment sur la définition d'une profondeur dite de fermeture au-delà de laquelle il n'y a pas de transport sédimentaire significatif. Mais cela est contredit par de nombreuses observations (Thieler et al., 2000).
- L'utilisation d'une granulométrie moyenne constitue une approximation car aucune plage n'a une granulométrie uniforme sur l'ensemble du profil. Il est certes conseillé de prendre la granulométrie de la zone de surf car SBEACH est gouverné essentiellement par les phénomènes de transport dans la zone de surf, mais ce choix n'est pas anodin (Rosati et al., 1993). En effet, il fait parti des trois grandes recommandations données pour l'utilisation de SBEACH : la plage doit avoir une granulométrie comprise entre 0.1 et 2 mm et « raisonnablement » uniforme le long du profil. Ceci est le cas du littoral étudié.

Pour information, les deux autres recommandations portent sur l'effet négligeable du transport longshore et sur le fait que ce sont les variations de hauteur d'eau et le déferlement des vagues qui sont principalement responsables du transport sédimentaire.

Il est relativement difficile de pouvoir dire quelle approximation est responsable de quel effet sur nos résultats car tous ces phénomènes sont liés et se recoupent. Mais il ressort néanmoins que les résultats un peu décevants obtenus avec SBEACH sur les profils de Rousty peuvent trouver des explications dans l'usage des données en notre possession et dans la formulation du logiciel.

1.4. CONCLUSION

Ces essais ont permis d'étudier la modélisation de l'évolution d'un profil de plage au cours d'une tempête à l'aide du logiciel SBEACH, qui est un des logiciels les plus utilisés pour cette problématique. Le but poursuivi ayant été de pouvoir simuler par la suite le comportement de profils types de plage pour des situations de référence. Or les résultats obtenus avec les profils de la plage de Rousty se révèlent un peu décevants pour notre application. En effet, le recul du trait de côte est certes bien évalué mais la forme de la partie supérieure du profil et notamment de la berme n'est pas très bien rendue. L'accrétion sur la berme, par exemple, n'est pas bien reconstituée par le modèle, ce qui n'est pas très étonnant car cela constitue une des failles réputées de SBEACH.

A partir des résultats obtenus, on peut donc conclure que ce logiciel ne correspond pas totalement à notre attente :

- Il permet de calculer le recul du trait de côte,
- mais il ne génère pas la berme (surélévation), source de protection accrue pour l'arrière-plage.
- Le déplacement des barres sous-marines

1.5. BIBLIOGRAPHIE CITEE

Larson M., Kraus N.C. & Byrnes M.R. (1990) – « SBEACH : Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change – Report 2 – Numerical Formulation and Model Tests », US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Technical Report CERC-89-9

Rosati J.D., Wise, R.A., Kraus N.C. & Larson M. (1993) – « SBEACH : Numerical Model for Simulating Storm-Induced Beach Change – Report 3 – User's Manual », US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Instruction Report CERC-93-2.

Schreiber C. (1999) – « Rôle des tempêtes dans l'évolution du littoral – Evaluation des différentes techniques de modélisation », rapport de stage de fin d'étude au BRGM – Brest, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Nancy.

Sommerfeld B.G., Kraus N.C. & Larson M (1996) – « SBEACH-32 Interface User's Manual – Final Report », Conrad Blucher Institute for Surveying and Science, Texas A&M University - Corpus Christi, Report TAMU-CC-CBI-95-12.

Thieler E.R., Pilkey O.H., Young Jr. R.S., Bush D.M. & Chai F. (2000) – « The Use of Mathematical Models to Predict Beach Behavior for U.S. Coastal Engineering : A Critical Review », Journal of Coastal Research 16, p. 48-70.

2. Modélisation des surcotes

2.1. INTRODUCTION

Cette partie de l'étude, confiée à Météo-France (Direction InterRégionale du Sud-Est - DIRSE), avait pour objectif d'analyser la faisabilité de prévisions de surcotes marines sur le secteur des Saintes-Maries-de-la-mer.

Le phénomène de surcote consiste en une variation locale et temporaire du niveau de la mer provoquée par les variations du vent et de la pression atmosphérique. L'élévation du niveau d'eau de la mer due à de faibles pressions est appelée effet barométrique inverse : une baisse de pression de 10 hPa provoque une hausse du niveau de la mer de 10 cm. Loin des côtes et en eau peu profonde, l'élévation reste assez faible et correspond à l'effet barométrique inverse, tandis que près des côtes, les effets dynamiques (vent, courants) prennent de l'ampleur et amplifient la surcote.

Météo-France a développé dans les années 90 un modèle de surcotes pour le littoral Manche-Atlantique qui est aujourd'hui opérationnel. En 2001, l'adaptation de ce modèle au bassin de la Méditerranée occidentale a été menée dans le cadre d'une étude cofinancée par la Délégation de la Prévention des Pollutions et des Risques (DPPR du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement). Cette adaptation s'est faite sur la base de 6 événements météorologiques en prenant appui sur des relevés des hauteurs d'eau de la mer en quelques stations (Ajaccio, Marseille, Monaco, Nice, Sète et Toulon).

2.2. LES SITUATIONS MODELISEES

A continuation de l'étude citée ci-dessus et dans le cadre de la présente étude, la DIRSE a communiqué aux équipes travaillant à l'adaptation du modèle cinq événements marquants sur le secteur des Saintes-Maries extraits sur la période allant de novembre 1994 à décembre 1999 :

- 1 au 12 janvier 1994
- 10 au 15 novembre 1996
- 7 au 29 décembre 1997
- 16 au 27 septembre 1999
- 24 au 31 décembre 1999

Pour l'ensemble de ces périodes, nous disposons des hauteurs d'eau au Grau de la Dent, desquelles les surcotes et décotes ont été extraites en retranchant la marée astronomique.

Cas du 1 au 12/01/1994 : tempête de Sud-Ouest. A provoqué d'importants dégâts sur le littoral des Bouches-du-Rhône et du Var. Le vent de sud-ouest lève une houle de 3 à 4 mètres sur le Golfe du Lion. En même temps, les rivières provençales et le Rhône connaissent des crues dévastatrices. Le 8/01, on enregistre un débit de 11 000 m³/s pour le Rhône à Beaucaire. La Camargue est inondée suite à la rupture de digues du Rhône.

Cas du 10 au 15 novembre 1996 : tempête d'Est Sud-Est. Les plus fortes surcotes sont observées dans le Golfe du Lion.

Cas du 7 au 29 décembre 1997 : tempête exceptionnelle tant par sa durée que par son intensité. Une des plus violentes au cours des 20 dernières années. Des vagues de plus de 10 mètres sont levées dans le golfe du Lion.

Cas 16 au 27 septembre 1999 : tempête exceptionnelle tant par sa durée que par son intensité. Une des plus violentes au cours des 20 dernières années. Des vagues de plus de 10 mètres sont levées dans le golfe du Lion.

Cas du 24 au 31 décembre 1999 : tempête "mémorable" qui a balayé l'ensemble du territoire national. Le long des côtes méditerranéennes, un flux d'ouest violent se traduit par des vents dépassant les 120 km/h les 27 et 28 décembre. Une surcote de 95 cm est atteinte à Marseille dans la nuit du 27 au 28 décembre.

2.3. MISE EN ŒUVRE DE LA MODELISATION

Le modèle de surcote a été mis en œuvre pour les différents événements avec les forçages atmosphériques correspondants, issus des modèles météorologiques CEPMMT (Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme), Arpège et Aladin.

Le CEPMMT est un modèle global de prévision qui offre toutes les 6 heures les champs de vent et de pression avec une résolution horizontale faible de 1° et une fréquence temporelle de 6 heures.

Arpège est un modèle atmosphérique global de Météo-France qui travaille avec maillage de 0,25°. Les champs analysés sont disponibles avec une fréquence de 6 heures également.

Aladin est un modèle haute résolution (0,1 ° en horizontal) utilisé par Météo-France pour affiner les prévisions sur la France. Les analyses sont disponibles toutes les heures et les prévisions toutes les 3 heures. Il permet de reconstruire un forçage atmosphérique avec une fréquence temporelle de 3 heures.

2.4. RESULTATS DE LA MODELISATION

Les figures IV-7 à IV-11 représentent les résultats obtenus sur les cinq événements analysés.

Les valeurs de surcote fournies par le modèle ont été comparées aux valeurs relevées au Grau de la Dent. Les résultats sont intéressants à 3 niveaux :

- le modèle "voit" les phénomènes,
- le calage temporel est bon,
- mais il reste une sous-estimation (biais systématiques) qui peut être corrigée à ce stade par une régression linéaire.

Cette régression linéaire a été déterminée sur la base des 5 événements, prenant tous les couples de points (niveau observé, niveau prédit). La surcote (ou décote) calculée par le modèle est corrigée par la formule suivante : $Valeur_{cor} = Valeur_{mod} \times 1,46 + 22$.

On obtient alors une bonne correspondance entre les valeurs observées et les valeurs modèle corrigées.

Ces conclusions, tirées de l'application du modèle aux surcotes en Camargue, vont dans le même sens que celles issues du rapport de Météo-France pour la DPPR :

- L'adaptation du modèle au bassin de la Méditerranée occidentale permet de disposer depuis 2002 d'un modèle apte à la pratique opérationnelle de routine
- Le modèle a montré sa capacité à prévoir les surcotes de manière satisfaisante. Les erreurs de prévision sont liées aux erreurs commises sur la prévision du vent ou d'une faible résolution (temps et espace) du forçage atmosphérique.

Le modèle développé par Météo-France est en mode pré-opérationnel depuis décembre 2001 pour des prévisions quotidiennes.

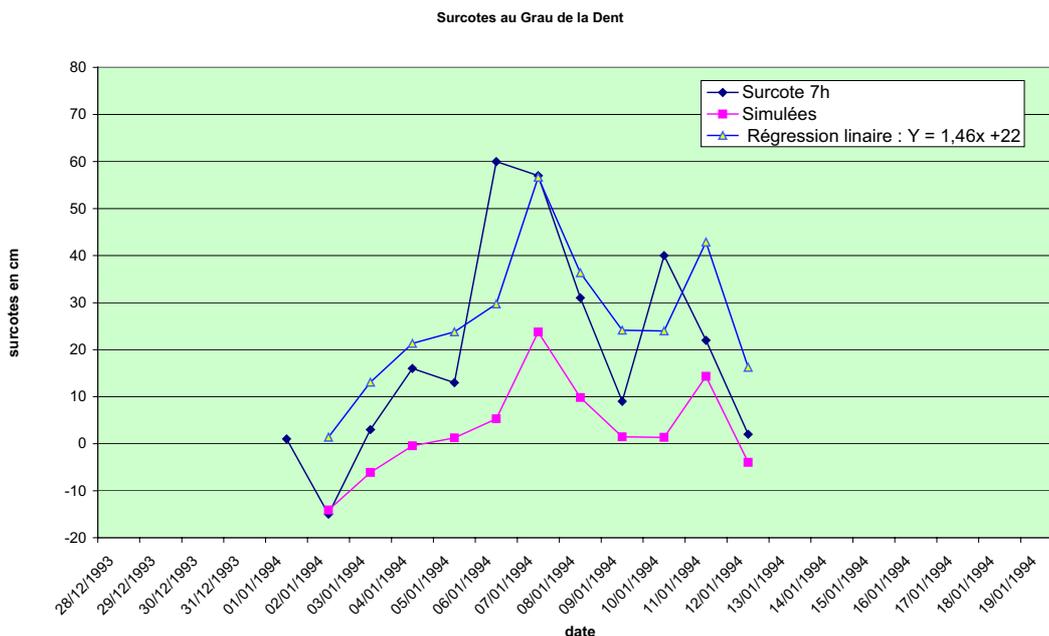


Figure IV-7 : Surcotes observées et modélisées du 1 au 12 janvier 1994

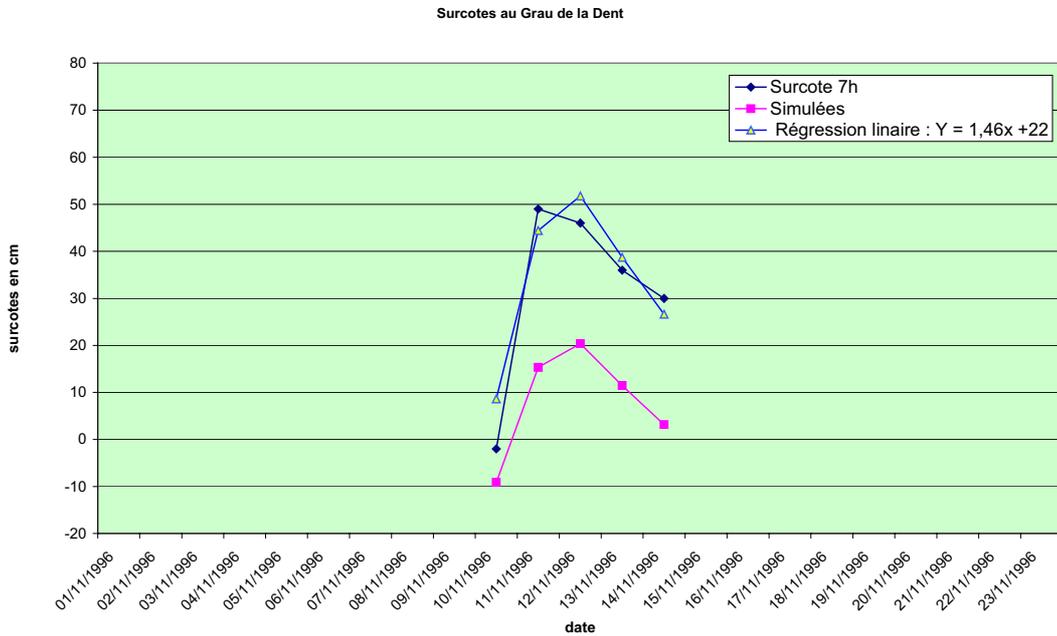


Figure IV-8 : Surcotes observées et modélisées du 10 au 15 novembre 1996

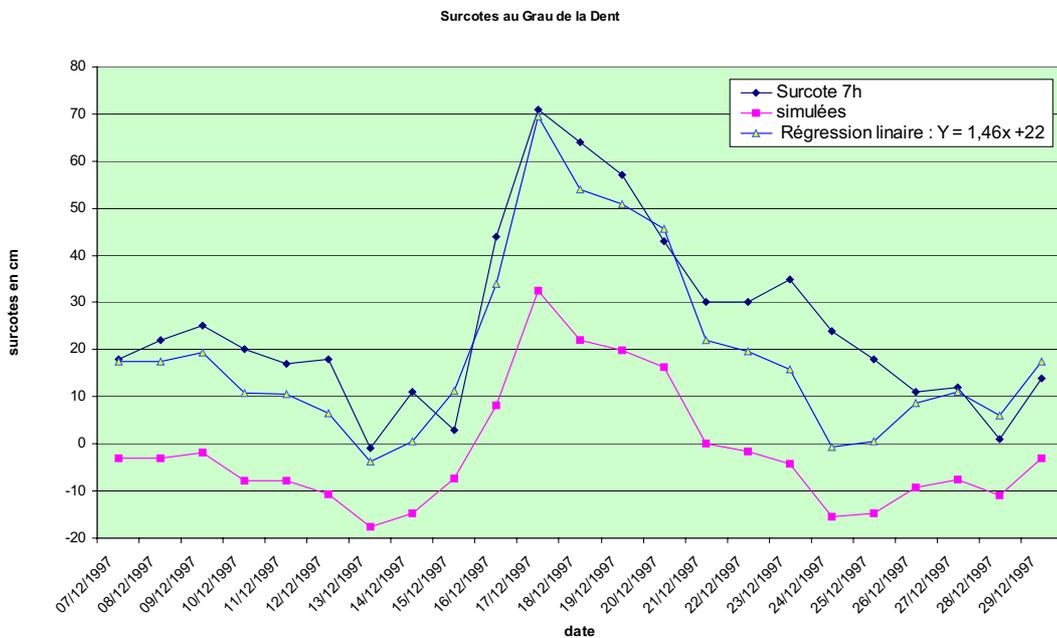


Figure IV-9 : Surcotes observées et modélisées du 7 au 29 décembre 1997

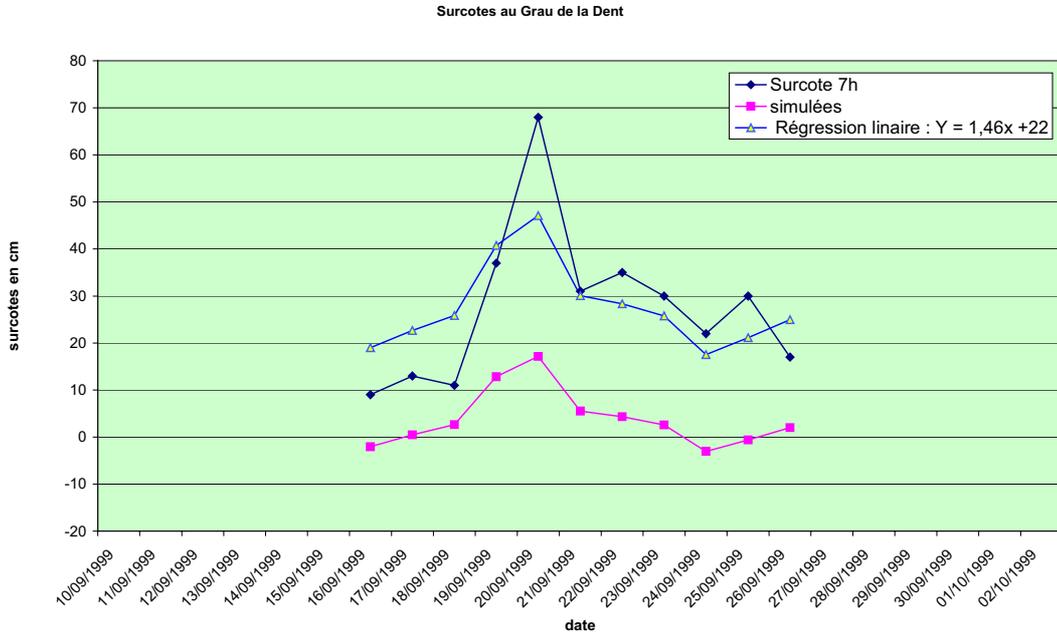


Figure IV-10 : Surcotes observées et modélisées du 16 au 27 septembre 1999

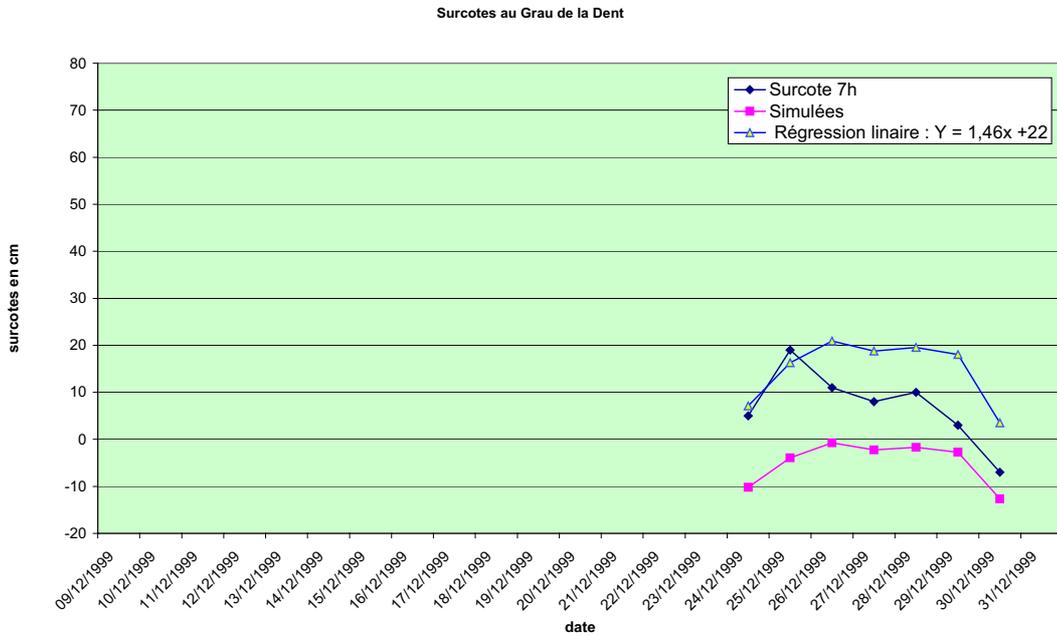


Figure IV-11 : Surcotes observées et modélisées du 24 au 31 décembre 1999

PARTIE V : ENJEU X

Ce document reprend les résultats des entretiens tenus avec Mme Marobin (PNRC), MM. Ferdier (CSMSE), Fourcoux (Mairie des Saintes-Maries-de-la-mer) et Coulet (RNC) et des documents mis à notre disposition par ces interlocuteurs.

L'objectif de ces entretiens était de cerner le point de vue des responsables confrontés, à différents titres, aux risques de submersion du littoral et de mettre en avant les enjeux menacés.

1. La Compagnie des Salins du Midi et du Sud-Est (CSMSE)

1.1. FONCTIONNEMENT DE L'EXPLOITATION DES SALINS D'AIGUES-MORTES

Les salins emploient 191 personnes à fin 2002. Le Salin d'Aigues-Mortes produit en moyenne 400 000 tonnes de sel par an, la production fluctuant suivant la climatologie. Cette activité, bien qu'elle comporte une phase finale "industrielle", est assimilée à une activité agricole.

La production du sel est le résultat d'une évaporation lente des 9/10 du volume d'eau de mer d'une salinité initiale de 29 g/l pour obtenir une saumure saturée à 260 g/l.

On distingue deux types de terrains sur le territoire du Salin d'Aigues-Mortes, qui occupe près de 11 000 ha :

- les surfaces préparatoires ou partènements sur 7600 ha
- et les cristallisoirs ou tables salantes sur 400 ha

Les surfaces restantes (3000 ha) ne sont pas intégrées dans la marche du Salin mais elles représentent une très importante valeur environnementale.

1.2. LE PARCOURS DE LA FABRICATION DU SEL

L'eau de mer est pompée par une seule prise d'eau (station n°1, en limite entre les départements des Bouches-du-Rhône et du Gard). La puissance de pompage est d'un million de m³ / jour.

L'eau s'écoule en suivant la topographie du terrain dans les surfaces préparatoires (partènements). Elle est surélevée quand nécessaire par différentes stations de pompage.

Il y a une épaisseur de 30 cm de saumure dans chaque plan d'eau. Une fois saturées les saumures sont dirigées dans les tables salantes nivelées à la perfection pour permettre une récolte sans insolubles.

Le climat méditerranéen est cyclique, il y a donc des périodes où bilan évaporation-pluie est "positif" (de mars à septembre), et des périodes où il est "négatif" (d'octobre à février). Cela entraîne une gestion adaptée des eaux.

La récolte se déroule en septembre avant que les pluies de l'automne ne soient trop pénalisantes.

La vocation du Salin d'Aigues-Mortes est la production de sel alimentaire. Ceci est rendu possible grâce :

- à une maîtrise des techniques spécifiques en gestion des mouvements des eaux ;
- au sol constitué de sables ; le sable décante très bien et lors des récoltes seul le sel, dépourvu d'insolubles, est stocké en forme de montagnes appelées camelles.

Le site des Salins est exceptionnel :

- il ne subit pas de pollution extérieure (pas d'usine dans les alentours, agglomérations éloignées...);
- il a pu bénéficier d'une activité salinière sans interruption depuis ses origines ;
- il abrite une faune et une flore exceptionnelle par sa diversité et spécificité.

Le site demeure néanmoins vulnérable par des pollutions possibles :

- les intrusions marines ;
- une pollution accidentelle en provenance de la mer (trafic maritime) ;
- les crues du Rhône qui conduisent à forte baisse de salinité des eaux côtières par régime de vents d'Est ou Sud-Est et à des eaux côtières de qualité moindre.

Pour faire face à ces deux derniers cas de figure, la station de pompage en mer peut être arrêtée.

Du fait de la gestion de l'écoulement des eaux à l'intérieur des partènements, guidée par le besoin d'augmenter progressivement la salinité des eaux jusqu'aux cristallisoirs, on trouve sur le territoire des Salins tous les stades intermédiaires de milieux depuis des étangs à 29 g/l jusqu'à des surfaces hyper concentrées proches de la saturation à 260 g/l. A ces milieux correspondent des faunes et des flores spécifiques, qui au total constituent un formidable assortiment garant d'une biodiversité exceptionnelle. On notera la grande richesse avifaunistique notamment de l'étang du Fangassier, seul lieu de nidification des flamands roses.

1.3. EN CAS DE SUBMERSION MARINE

Pour mémoire, lors de la tempête de 1982, la mer a envahi une partie excentrée du Salin d'Aigues-Mortes (Repau-Levant). Elle s'est engouffrée à travers une brèche sur le littoral gardois (commune du Grau du Roi) et les eaux sont venues diluer la saumure des bassins de réserve. Cet événement a occasionné des travaux importants de remise en état.

A l'est de la prise d'eau (littoral sur la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer), les terrains sous propriété de la CSMSE s'étendent sur 7,4 km. Un mince cordon littoral, en partie artificiel depuis la levée entre 1979 et 1981 d'une succession de digues de haut de plage (longueur totale de 5 km) prenant appui sur des massifs dunaires, constitue l'ultime rempart contre la submersion marine des étangs situées à l'arrière (Clos de la Comète, Etang de Fer et Clos de Brasinvert) qui représentent une

superficie de 650 ha participant directement à la production des Salins (9% des surfaces préparatoires). A l'arrière de ces étangs, le CSMSE a reconstruit en 1971 la digue de deuxième ligne destinée à empêcher la pénétration des eaux de mer au-delà de ceux-ci. Entre 1971 et 1982 la cote de couronnement de cette digue est portée à +1.6 m NGF, et sur les portions détruites en 1982 à +1.8 m NGF.

Selon la CSMSE, les dommages économiques induit par une submersion de ces étangs ne sont pas directement proportionnels aux surfaces affectées par l'invasion par la mer, mais bien supérieurs. La régulation de la salinité tout au long du parcours de l'eau dans le réseau des partènements est affectée de sorte qu'atteindre une salinité de 260 g/l en bout de circuit est compromise et par là la production annuelle serait gravement affectée. Par ailleurs les assauts de mer auront ouvert des brèches sur les plages, les digues frontales auront été endommagées, de même que la digue de deuxième ligne ; tout ceci conduisant à des travaux importants de confortement et reconstruction, financièrement lourds pour la Compagnie.

1.4. INCIDENCES DE LA STRATEGIE DE DEFENSE DU LITTORAL DEPLOYEE PAR LA CSMSE

La stratégie engagée depuis les années 60 par la CSMSE, d'abord pour protéger les prises d'eau de mer, puis pour endiguer le phénomène de recul du trait de côte et se protéger des submersions marines sur l'ensemble du linéaire, a permis d'atteindre ses objectifs et de garantir jusqu'à ce jour la pérennité de l'activité des Salins.

Il est clair que si ces actions n'avaient pas été menées, le littoral aurait connu une évolution naturelle vers une situation tout autre : destruction des dunes bordières, ouverture de nombreuses brèches sur le cordon résiduel, échanges non maîtrisés entre étangs et mer, se soldant par des modifications radicales du milieu.

Selon la CSMSE, l'abandon de la protection littorale des côtes du Salin aurait des impacts négatifs au-delà de son territoire, notamment à l'ouest du Rhône Vif (Gard), rappelant les événements de 1982 et plus récemment, quoique moins dramatiques, de 1997 au cours desquels les terres cultivées de vigne et asperges furent envahies par la mer en empruntant le bras mort du Rhône de Saint-Roman.

Toujours selon la CSMSE, tirer un trait sur les partènements proches du littoral (Clos de la Comète, Etang de Fer, Clos de Brasinvert) en abandonnant la ligne de défense actuelle aurait :

- En premier lieu un impact sur l'activité salicole, par perte de surfaces efficaces de partènements et par hypothèque à terme de la seule prise d'eau dont dispose le salin pour l'alimentation, et par voie de conséquence l'abandon de la ligne de défense conduirait à l'arrêt complet de l'activité.
- En second lieu, quand bien même l'activité du salin pourrait être sauvegardée malgré l'abandon des partènements côtiers, les mesures de protection contre la mer se reporteraient loin à l'intérieur des terres par le renforcement des digues de deuxième ligne qui ne sont pas de nature aujourd'hui à s'opposer à l'action directe de la mer.

2. La commune des Saintes-Maries-de-la-mer

La commune compte 2 500 habitants en hiver et 40 000 en été. Elle occupe une superficie de 37 000 ha comprenant à la fois des sites classés, des sites inscrits, des zones de protection spéciales (depuis la convention RAMSAR 1979 jusqu'à plus récemment les plans Natura 2000).

Le littoral de la commune peut être scindé en 3 zones :

- Le village et toute la zone à l'est,
- la zone allant du village au Petit Rhône,
- du Petit Rhône jusqu'à de la limite de commune à l'ouest (Grau du Roi - Gard)

La zone la plus sensible est la partie comprise entre le Petit Rhône, à l'ouest, et la Baisse du Radeau à l'est (à l'est du Pertuis de la Fourcade). Une submersion des zones habitées serait insupportable. Mais tout programme de protection du village doit aller jusqu'à la Baisse du Radeau

Le village représente des enjeux humains et économiques importants (tourisme, culturel...)

La petite Camargue représente des enjeux économiques (agriculture, tourisme...) et écologiques

La zone de la Baisse du Radeau représente des enjeux écologiques et économiques (tourisme)

La protection doit être envisagée d'un point de vue global car les enjeux sont globaux, tant humains, qu'économiques et environnementaux.

Cette protection ne doit pas être forcément lourde (enrochements par exemple), mais peut être basée sur des systèmes de type rechargement en sable, par exemple sur le Grand Radeau. Mais elle devrait être définitive.

A l'heure actuelle, les ouvrages existants, à l'est des Quatre-Maries, entre la Baisse de l'Evêque - Grande Rhée Longue et le Grand Radeau, ne sont plus efficaces : les épis construits en 1986 sont contournés par la mer, d'importantes portions de la digue frontale sont détruites. Ce secteur appartient à la Commune. La municipalité estime que des travaux de reconstruction sont nécessaires et urgents. Une question est posée : les épis raccordés à la digue frontale sont-ils plus efficaces ?

Selon la commune, les zones à protéger en priorité sont :

- le village aussi bien à l'avant (les digues frontales existent et sont résistantes), qu'à l'arrière (si les venues de mer se font par contournement) : le Symadrem a été créé pour cela (Gestion de la Digue à la mer, à l'origine) ;
- la zone de la Baisse du Radeau, à l'est du village, car la submersion peut contourner et inonder le village par contournement ;
- le secteur Ouest : Grand Radeau et petite Camargue (où le petit Rhône, compte tenu de ses méandres actuels, peut aussi entraîner des problèmes d'inondation en période de crue)

La commune estime que le problème vient davantage de la mer que du fleuve. La petite Camargue est une zone submersible par nature, donc une inondation par le fleuve est mieux acceptée que par la mer.

Conserver le trait de côte s'avère indispensable, car s'il venait à reculer (jusqu'où ?), le risque serait grand de perdre un milieu écologique riche.

De grosses dépenses ont été engagées dans la lutte contre l'érosion du littoral (50 MF pour 63 épis en Petite Camargue...) mais aussi dans le maintien d'un milieu naturel (plantations, zones agricoles préservées...): accepter le recul du trait de côte reviendrait à accepter que les dépenses n'aient servi à rien.

Le cas particulier du Grand Radeau montre que le phénomène est très rapide. Le secteur était constitué d'une digue frontale. Elle a été démantelée en grande partie entre janvier et mars 1996. Elle est aujourd'hui pour moitié inefficace. Les dossiers pour la remettre en état sont bloqués. Les responsables de la commune s'interrogent sur la cohérence des politiques d'aménagement. Si, dans la partie est de Petite Camargue les épis n'ont pas été enracinés à la digue frontale, c'est qu'il n'y a pas eu les autorisations de le faire.

Les enjeux fonciers sont également très importants dans le secteur du Grand Radeau.

Les aménagements de type épis en T et brises lames s'avèrent être les plus efficaces en terme de protection.

Ce n'est pas la peine de laisser-faire, si c'est pour « se défendre » contre la mer dix ans plus tard... mais plus en retrait. Pour préserver la commune, il faut conserver le trait de côte.

La commune attend de l'Etat une position claire et cohérente, en apportant son soutien aux travaux de protection contre l'érosion en petite Camargue (terrains situés à l'ouest du Petit Rhône), sur le littoral du village et à l'est, plutôt que des décisions et autorisations qui tardent à venir.

3. Le Parc Naturel Régional de Camargue

Un rapport a été réalisé et met en évidence le diagnostic et les enjeux du territoire camarguais dont la partie littorale : il s'agit du dossier préalable du « Contrat de Delta ». Le Parc y est maître d'ouvrage. Les enjeux identifiés sont de deux types : enjeux humains et Patrimoine naturel (notamment au droit de la Réserve, et au Grand Radeau). Une synthèse de ce travail reprend ici les points de l'étude qui ont trait aux enjeux face au risque de submersion marine.

3.1. CADRE NATUREL

La Camargue est un milieu complexe et composite, gouverné par l'hydrologie : à la fois sous l'influence du Rhône et de la mer. C'est également un milieu "artificiellement naturel", compartimenté selon l'usage de l'espace et les types d'agriculture et d'élevage pratiqués. Le delta est parcouru d'un réseau de drainage qui gouverne les échanges. Très tôt des canaux ont été réalisés pour assainir les terres et favoriser leur mise en cultures.

Avec l'endiguement intégral du Rhône destiné à protéger la Camargue des inondations, celle-ci se trouva privée des apports d'eau douce qui compensaient le déficit hydrique naturel et qui permettaient de faire face à la remontée de la nappe d'eau salée. Pour palier ce problème, un important système de canaux d'irrigation fût construit, favorisant le développement de la riziculture, pour laquelle d'importants volumes d'eau sont nécessaires mais qui doivent ensuite être évacués vers l'étang du Vaccarès, dépression centrale naturelle de la Camargue d'une superficie de 6 400 ha. En 1955, un système de pompage renvoyant partiellement les eaux en surplus vers le Rhône fût mis en place.

Avant la construction de la Digue à la Mer, les échanges entre étangs et mer se faisaient naturellement à travers des graus, passes étroites à travers le cordon littoral, dans les deux sens selon les conditions hydro-météorologiques :

- entrée d'eau de mer pendant les tempêtes
- écoulement vers la mer en période pluvieuse.

En l'état "naturel" initial, les échanges présentaient un fort caractère aléatoire, et par-là une forte variabilité annuelle et inter annuelle naturelle. Les graus constituaient également des lieux d'échanges biologiques indispensables pour le fonctionnement écologique du système. Les lagunes, de par leur importante productivité biologique constituent une aire essentielle pour le grossissement de espèces marines.

Le bassin central de la Camargue (zone comprise entre l'étang de Vaccarès et la mer, étang dit l'Impérial, étang de Malagroy, étang du Lion...) n'est pas équipé de station de pompage. Ce système lagunaire est en communication avec la mer par l'intermédiaire d'ouvrages hydrauliques qui traversent la Digue à la Mer : le pertuis de la Fourcade, du Rousty et de la Comtesse. Aujourd'hui, suite à l'ensablement séculaire du golfe de Beauduc, seul le Pertuis de la Fourcade est opérationnel tout au long de l'année. Ses possibilités d'évacuation dépendent de la différence entre le niveau des étangs et le niveau de la mer. La gestion de cet ouvrage revêt un enjeu majeur tant pour lutter contre les inondations (remontée du niveau des étangs) que pour agir sur la salinité de

l'eau dans le système lagunaire. Le Pertuis du Rousty n'est utilisé qu'à titre exceptionnel pour évacuer les eaux de crues du delta. Des conflits récurrents apparaissent entre usagers lorsque les intérêts en jeu (agriculture, pêche, gestion de la Réserve nationale...) rendent incompatibles niveaux et salinité.

Les milieux naturels camarguais sont d'une richesse majeure qui fait la réputation internationale de la Camargue. La plupart de ces milieux sont directement liés à l'eau soit de manière naturelle, soit par la gestion assurée par l'homme.

Pour la flore, plus de 1000 espèces sont recensées en Camargue, soit plus de 20 % de l'ensemble de la flore française métropolitaine. 59 espèces sont classées d'intérêt patrimonial au titre de la Directive européenne Habitats. Ces espèces sont liées pour moitié au milieu littoral incluant les eaux saumâtres et pour un tiers aux milieux humides et aquatiques d'eau douce.

La Camargue est le premier site français pour sa richesse avifaune : on y dénombre 366 espèces, soit plus de la moitié des espèces présentes en France, dont 132 nicheuses. 115 espèces d'intérêt patrimonial au titre de la Directive européenne Habitat sont présentes en Camargue. Enfin, le flamant rose fait de ce territoire son unique lieu de nidification en France, situé à l'îlot du Fangassier dans le domaine des Salins de Giraud.

Mammifères et poissons sont également bien représentés. Une trentaine d'espèces de mammifères est présente en Camargue. On trouve également trois types de poissons : poissons d'eau douce, poissons d'étang saumâtre qui côtoient les poissons de mer qui rentrent au stade d'alevin au printemps dans les étangs et en ressortent à l'automne après grossissement (loup, muge, sole...), et enfin des poissons migrateurs comme l'anguille. Pour ces deux derniers types, les échanges étang / mer sont indispensables.

Globalement, l'importance écologique de la Camargue peut être approchée à travers les nombreux statuts de protection qui lui ont été attribués tant au niveau national qu'international :

- Premier site français désigné au titre des "zones humides d'importance internationale" par la convention de RAMSAR ;
- les 13 000 ha du système lagunaire du Vaccarès déclarés Réserve naturelle nationale

Il faut noter qu'au sens de la Directive européenne Habitat, les habitats sont des "zones terrestres ou aquatiques se distinguant par leurs caractéristiques abiotiques et biotiques qu'elles soient entièrement naturelles ou semi-naturelles".

3.2. LA GESTION DE L'EAU

Compte tenu de l'importance de la gestion de l'eau en Camargue, une Commission Exécutive de l'Eau a été mise en place à la suite des inondations du Rhône de 1993 et 1994. Elle réunit les agriculteurs, les pêcheurs, le garde digue (agent des Saintes-Marie, manœuvre des martelières), la DDAF, le CG13, la Réserve, la Tour du Valat (station biologique), le Parc, les riverains et les mairies des Saintes et d'Arles. Cette commission est placée sous l'autorité de la DDAF, représentant de la police de l'eau et le PNRC en est le coordinateur.

La Commission Exécutive de l'Eau réunit deux fois par an l'ensemble des acteurs intéressés par la gestion des niveaux et salinité des étangs. Les décisions arrêtées par la commission sont basées sur les besoins, parfois contradictoires exprimées par les usagers, mais il ressort des débats des objectifs consensuels de niveaux et de salinité pour la période à venir. Les décisions portent surtout sur la gestion des ouvertures de la Digue à la Mer et notamment du Pertuis de la Fourcade.

Un bulletin hydrologique mensuel coordonné par la DDAF, et réalisé en partenariat avec la Réserve Nationale de Camargue, la Station Biologique de la Tour du Valat et le PNRC, fournit les éléments d'adaptation des consignes d'ouverture et de fermeture des pertuis afin d'atteindre les objectifs sur les niveaux et la salinité des milieux. Les manœuvres des vannes (Pertuis de la Fourcade) répondent alors aux objectifs niveaux / salinité adoptés par la commission. Ces manœuvres sont tributaires des niveaux de la mer et des conditions météorologiques.

3.3. OCCUPATION DE L'ESPACE ET ACTIVITES

Le territoire camarguais (Ile de Camargue) présente quatre grands types d'occupation des sols :

- le milieu agricole (40 000 ha)
- le milieu salicole (14 000 ha)
- les milieux naturels
- les zones urbaines, hameaux et mas isolés

Des activités complémentaires sont également importantes d'un point de vue économique, social et culturel :

- l'élevage extensif, organisé en manades, du cheval (3 000 têtes) et du taureau (15 000 têtes), développé sur les zones défavorables à l'agriculture (marais, sansouires et pelouses)
- la pêche professionnelle dans tous les milieux du delta (fleuve, mer, étangs, marais et lagunes)
- la chasse au gibier d'eau
- et un tourisme fort et diversifié (balnéaire, plaisance, nature, découverte et traditions camarguaises)

Les secteurs (territoires ou activités) potentiellement affectés par l'évolution du trait de côte et les phénomènes de submersion marine sont principalement :

- De façon directe, le tourisme (disparition des plages) et l'activité des salins.
- De façon induite, les activités conduites sur les milieux affectés par les modifications apportées au régime hydrologique (niveaux, salinité) des lagunes, étangs et marais.

Le SYMADREM (Syndicat Mixte d'Aménagement des Dignes du Rhône Et de la Mer) est la structure qui a la responsabilité des études et travaux pour assurer la protection de la Camargue, tant vis à vis des risques d'inondation du Rhône que de la mer. La Digue à la mer protège le littoral de la submersion marine entre les deux bras du Rhône (Petit et Grand Rhône). La Digue à la Mer, dans sa partie où l'Etat est propriétaire, était à l'origine gérée par le Syndicat de la Digue à la mer au statut d'association territoriale forcée ; la gestion a été transférée au SYMADREM, suite aux

inondations de 1993-94. L'ensemble des ouvrages de défense du littoral du village des Saintes-Maries-de-la-Mer a fait l'objet d'un transfert de concession en février 2001 ; il en est de même des ouvrages du Grand Radeau, initialement sous concession à la commune.

Globalement la Digue à la mer et les ouvrages connexes de protection (épis) ont assuré une bonne protection des terrains situés à l'arrière, sauf lors des tempêtes exceptionnelles de 1982 et 1997, où des brèches sont apparues.

3.4. ENJEUX PAR TYPE DE MILIEU OU D'ACTIVITE

La richesse des milieux naturels

La Camargue est un site d'exception, inscrit au titre de la convention RAMSAR par la France qui engage sa responsabilité dans la préservation de cette zone humide.

La Camargue constitue une "coupure" verte entre une côte languedocienne au tourisme hyper-concentré et une côte occidentale provençale défigurée par l'industrie lourde (complexe de Fos-sur-mer). Elle offre de nombreux usages du fait de la qualité biologique du milieu (pêche, chasse, tourisme). Le système lagunaire du Vaccarès est constitué de zones humides fortement protégées

La présence du village des Saintes-Maries-de-la-mer

Objectif incontournable. Sauvegarde du patrimoine historique, culturel et foncier. Protection des personnes et des biens.

L'activité salinière

Les salins constituent un grand ensemble à valeur écologique importante, avec une grande richesse avifaunistique. Il convient donc de maintenir ces grands ensembles où l'on trouve une gamme de milieux salés de fort intérêt patrimonial.

Cette activité traditionnelle, bien que modernisée, témoigne d'une longue histoire ancrée dans la culture locale.

La gestion des échanges mer / étangs

Ces échanges sont d'ordre biologique et hydraulique. Ils garantissent la biodiversité à l'intérieur du delta (niveaux, salinité), la reproduction et le grossissement de poissons...

La préservation de ces échanges passe par la gestion consensuelle des vannes des pertuis notamment celui de la Fourcade. Ce pertuis permet d'évacuer vers la mer 21 Mm3 d'eau par an. On estime à 5 Mm3/an le volume d'eau de mer entrant.

La présence d'un littoral sableux

Cet espace est naturellement la frontière entre le domaine marin et les zones humides. Sa protection assure le maintien des contrastes biologiques entre milieu marin et milieu lagunaire. Il constitue une zone attractive pour le tourisme balnéaire, activité économique saisonnière importante.

La forêt littorale

Afin de protéger la forêt camarguaise, une charte forestière est en projet avec pour périmètre le territoire du Parc Naturel Régional de Camargue. Cette charte forestière est en cours d'élaboration avec un co-portage PNR Camargue – ASL forestière des Radeaux de Camargue. Un premier dossier de candidature (Etat des lieux et Problématiques) a reçu l'agrément du ministère. Un programme d'actions doit être mis

en place et peut s'apparenter à un Contrat Territorial d'Exploitation pour la zone forestière.

Le Parc estime que les réponses aux risques de submersion en terme d'aménagements doivent être adaptées selon les types d'enjeux.

3.5. OBJECTIFS DU CONTRAT DE DELTA CAMARGUE

On retiendra comme objectifs en lien direct avec les enjeux et risques de submersion marine et d'érosion littorale :

- améliorer les potentialités d'échanges (biologiques et hydrauliques) entre mer / étangs / fleuve
- restaurer les milieux dunaires (ganivelles, plantations...)
- promouvoir des actions pilotes innovantes de gestion du trait de côte
- restaurer et renforcer les ouvrages de protection contre les crues et les tempêtes
- mettre en place un réseau de suivi des phénomènes d'érosion du littoral.

4. La Réserve Naturelle de Camargue

L'objectif de la Réserve est de conserver la qualité des éléments : eau, air, sol. Sa mission est de conserver un milieu assurant bon accueil pour la faune. La variabilité (dans l'espace et dans le temps) saisonnière et inter-annuelle est jugée indispensable, base de la biodiversité.

4.1. PROBLEMES RENCONTRES OU POTENTIELS

Ces problèmes sont d'ordre hydrologique :

- remontée de la salinité. Elle a atteint 150 g/l lors de la sécheresse de 1989 ;
- la salinité du Rhône due à la remontée de la mer dans l'embouchure. Ceci impacte sur la riziculture dès lors que l'apport d'eau douce provient du Rhône et que le riz meurt à 1 g/l de sel.
- 65 millions de m³ d'eau sont "récupérés" dans la Réserve en provenance des canaux de drainage, alors que le volume de l'étang de Vaccarès est de 100 millions de m³. Il devient donc de plus en plus difficile par la suite d'évacuer l'eau excédentaire.

Il existe 3 pertuis :

- La Fourcade, qui sera utilisée préférentiellement pour évacuer l'eau
- Le Rousty, qui fonctionne exceptionnellement
- La Comtesse, par où il est plus difficile d'en faire sortir l'eau

Le problème est double : recul du trait de côte et remontée du niveau de la mer. La mer au niveau de base à +0,14 m NGF ne permet plus de sortir les eaux en excès de manière efficace ; ceci engendre un risque d'inondation accru. Les conséquences potentielles du recul du trait de côte et/ou de la remontée du niveau de la mer sont :

- destruction des dunes
- risque accru de destruction de la digue à la mer (secteur de Rousty)
- risque de sursalure des eaux si la digue à la mer n'est plus maintenue alors que la Camargue ne bénéficie plus de "rinçages" par le Rhône lors des crues, depuis la construction des digues.

En novembre 1982, la digue à la mer a cassé par une tempête de sud-est dans le secteur du Pont du Rousty.

Les problèmes rencontrés aujourd'hui sur le delta proviennent du cloisonnement de celui-ci par les digues du Rhône et la Digue à la mer : si l'une d'elle vient à céder, le milieu devient durablement ou trop "doux" ou trop "salé", et les espèces s'adaptent ou disparaissent momentanément. On se retrouve donc à gérer un espace en maintenant artificiellement niveaux d'eau et salinités qui garantissent les diverses activités agricoles, pêche, chasse, et le maintien d'un milieu "naturel".

4.2. LES ENJEUX

Les enjeux reposent selon la Réserve sur la gestion de l'eau et la faune et la flore.

La gestion de l'eau

Nécessité de prendre en compte :

- la quantité (par exemple, on ramène beaucoup trop d'eau pendant la période estivale)
- la qualité (problèmes avec les pesticides...)
- le rythme

Un meilleur équilibre serait atteint si on diminuait les apports d'eau en été et si on diminuait l'usage des produits phytosanitaires et les apports de phosphore.

La gestion de la faune

Pour illustrer cela, le domaine de la Réserve est le lieu où un certain nombre de poissons d'eau mer viennent passer les 8 premiers mois de leur vie. La conservation du milieu est donc essentielle.

En conclusion, selon la Réserve, la succession d'accidents naturels (inondation fluviale ou marine) enrichit le milieu, et lui donne une biodiversité correspondant à un système de référence. Elle admet que l'accepter n'est certes pas compatible avec l'économie.

Centre scientifique et technique
Service Aménagement et Risques Naturels
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 33 (0)2 38 64 34 34