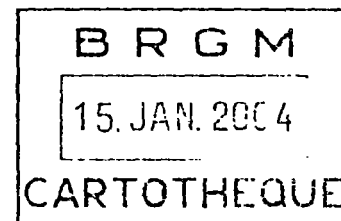


Document public



**Etude des phénomènes de
submersion marine
sur le littoral de la commune des
Saintes-Maries-de-la-Mer**
Rapport de synthèse final

BRGM/RP-52747-FR
décembre 2003

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

C. OLIVEROS
Avec la collaboration de
A. LAMBERT, 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. (2003) - Etude des phénomènes de submersion marine sur le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer. BRGM/RP-52747-FR, 46 p., 5 fig., 1 pl. hors texte, 2 ann.

© BRGM, 2003, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

1. Rappel de l'objectif de l'étude.....	5
2. Erosion, tempêtes et risques de submersion	7
3. Dynamique sédimentaire : un contexte global défavorable	9
4. Faire face à l'érosion et à la submersion.....	15
5. Les facteurs de la submersion	21
5.1. Zonage par facteurs de fragilisation.....	21
5.1.1. A l'est du Petit Rhône	21
5.1.2. A l'ouest du Petit Rhône	22
5.2. Zonage par facteurs artificiels de protection	22
5.2.1. Les protections douces	22
5.2.2. Les protections dures	23
6. Critères de qualification de la "vulnérabilité"	25
7. Résultat du zonage	27
8. Rappel des solutions générales envisageables pour le contrôle de l'érosion du littoral	29
9. Préconisations pour le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer	31
9.1. Secteur du village	31
9.2. Pertuis de la Fourcade	31
9.3. Secteur du Pont du Rousty	32
9.4. Secteur de l'Etang d'Icard	32
9.5. Secteur du Grand Radeau au Rhône Vif	32

9.6. Actions sur les apports solides du Petit Rhône.....33

ANNEXE 1 Photographies.....37

ANNEXE 2 Apports de la modélisation météorologique pour la prévision des tempêtes (houles et surcotes).....45

1. Rappel de l'objectif de l'étude

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 appuyé sur une étude bibliographique (rapports d'étude, données) réalisée préalablement (rapport de phase 1, BRGM/RP-51461-FR, janvier 2002). De même 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

Par ailleurs, il a été introduit un volet novateur par une étude spécifique abordant la prévision de tempêtes, afin d'évaluer la pertinence des modèles disponibles auprès de Météo France pour la prévision de conditions de houles et de surcotes à risque sur le secteur de Camargue. A terme, si les modèles devenaient pleinement fiables et opérationnels et si des structures pouvaient être mises en place, il est imaginable de mettre en place un système d'alerte non plus restreint à l'état de la mer (devenu classique pour les marins) mais étendu à la prédiction, quelques heures à l'avance, des surcotes attendues sur le littoral de Camargue. On se reportera à l'annexe 3 pour

Cette étude, qui pour une part constitue une synthèse des nombreux travaux de recherche et des rapports des bureaux d'étude, propose un état des lieux à la fois

précis et synthétique sur la problématique submersion. Elle ne se veut pas une pré-étude de travaux à mener, mais fournit une aide à la décision et à la définition de priorités d'actions. Par ailleurs, les éléments recueillis et analysés permettront de venir en appui à la mise en œuvre d'un PPR Littoral (érosion, submersion marine).

2. Erosion, tempêtes et risques de submersion

Le phénomène de submersion, tel qu'il s'est manifesté depuis plus de 20 ans sur le littoral à l'occasion de fortes tempêtes, est indissociable du recul du trait de côte qui conduit à réduire la plage et à détruire les dunes, barrières naturelles aux houles de tempête et surcote. C'est ainsi que sur le secteur du village des Saintes, à la Digue à Mer construite en 1914 furent ajoutés des ouvrages maritimes de type épi afin de retenir du sable au pied de la digue au centre du village. Dans les secteurs non urbanisés (Petite Camargue), les premières mesures ont consisté en la réalisation de digues de haut de plage afin de prévenir l'invasion des étangs lors des tempêtes.

Aujourd'hui, sur l'ensemble des secteurs, la réduction des risques de submersion est basée sur la stabilisation (parfois infructueuse) du trait de côte moyennant des épis et la protection du haut de plage par des digues frontales. Sur les Saintes, des ouvrages variés (brise-lames, épis, tenons) jouent le même rôle.

Au cours des 10 dernières années une douzaine de tempêtes, dont 7 majeures, ont affecté le littoral. Elles ont conduit à des dégâts importants sur des séries d'ouvrages. Les houles, de forte amplitude provenaient essentiellement des secteurs sud à sud-est. Elles ont souvent été associées à un relèvement important de l'altitude du plan d'eau (surcote), qui a atteint au cours d'une d'elles +1.14 m NGF.

3. Dynamique sédimentaire : un contexte global défavorable

L'ensemble du littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer subit depuis plus d'un siècle d'importants phénomènes d'érosion à l'ouest d'un "point d'équilibre" qui se situe légèrement à l'est de l'étang des Batayolles, alors que le fond du golfe de Beauduc continue de connaître une forte sédimentation.

Une illustration de ces évolutions est donnée sur la figure 1, qui représente de 1895 à 2000 l'évolution du trait de côte et les reculs ou avancées moyens annuels du trait de côte par périodes, 1895-1944-1952-1963-1979-1987-1995-2000 (données de base Sabatier, 2001).

L'une des causes principales de ces phénomènes en sont les profondes modifications qui ont affectées, le cours du Rhône depuis ces derniers siècles, et tout particulièrement depuis la fin du XIXème, avec la fixation définitive de son embouchure à l'extrémité est du delta. Les transits sédimentaires s'effectuent plus difficilement vers l'ouest en direction de Faraman, puis du Golfe de Beauduc. L'autre cause est la réduction importante, mais non chiffrée avec certitude des apports solides du Rhône (le Grand et le Petit), de sédiments et notamment de sa partie sableuse à silteuse.

Depuis le XVIème 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 significatif par le Petit Rhône, la dynamique sédimentaire a été profondément modifiée. 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. Une représentation de cette évolution des fonds est donnée en figure 2. On observera que sur un secteur qui va du village au Radeau de Brasinvert, on trouve en 1974 des profondeurs de 5 m à l'endroit même où se situait le trait de côte en 1895 ; et 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.

L'alimentation en sédiments d'origine fluviale est incertaine. Les volumes amenés par le Grand Rhône et le Petit Rhône ont été réduits au cours du XXème siècle en quantité et en qualité. Les sables restent essentiellement piégés tout au long du couloir du Rhône. Les apports du Grand Rhône, bien que réduits alimentent le littoral ouest de son embouchure et viennent en partie seulement compenser le déficit sédimentaire

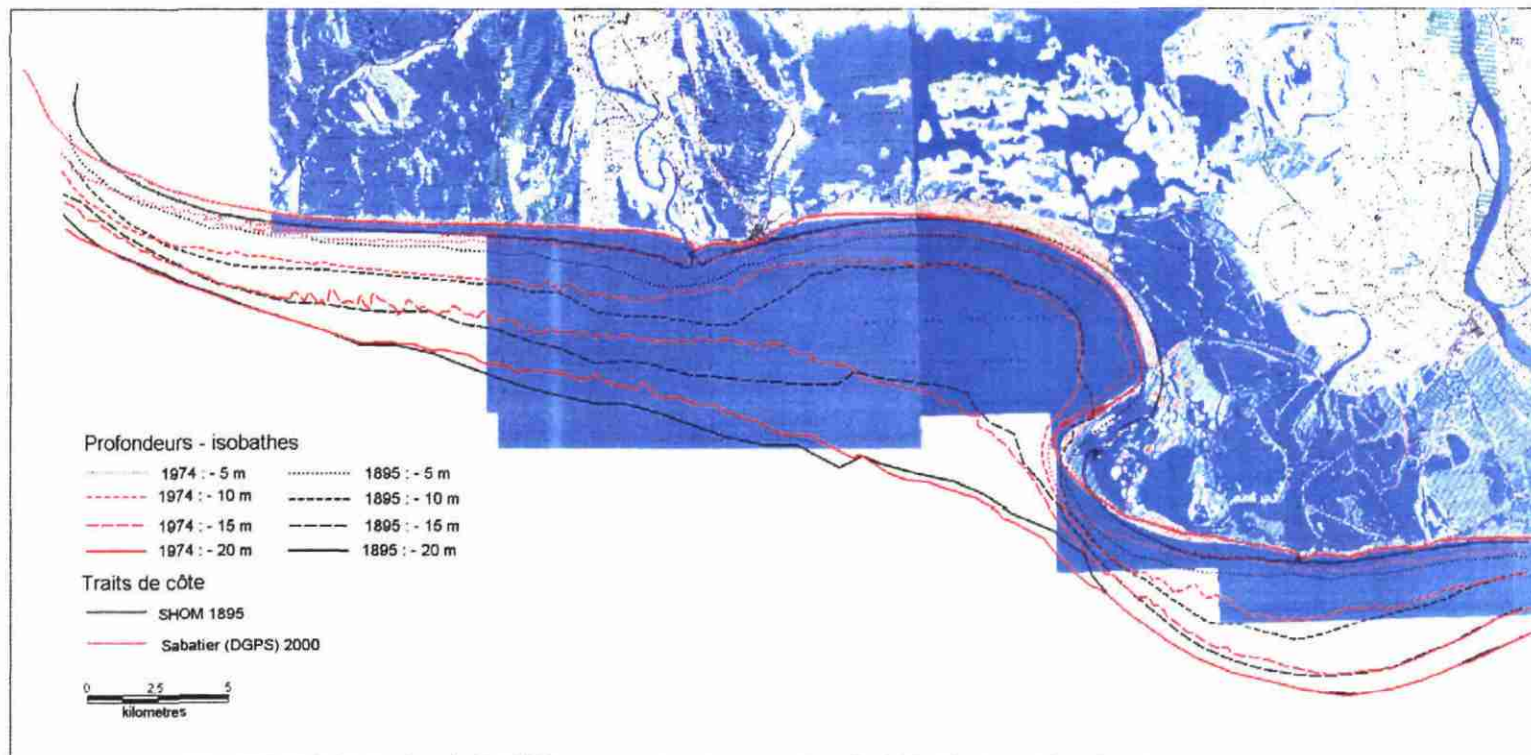
(secteurs ouest-Piémanson, Grau de la Dent, Grau de Véran). Un transfert vers l'ouest depuis le littoral sud de Beauduc vers les côtes de Petite Camargue n'est pas à exclure ; les sables pourraient être mobilisés par des fonds compris entre 10 et 15 m pour des houles de forte tempête de sud-est.

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. Ce transit est responsable de l'ensablement de la Pointe de L'espiguette, et du Golfe de Beauduc.

FIGURE 1 (A3)

Figure 2

Evolution des fonds entre 1895 et 1974 de Beauduc à l'Espiguette



fond cartographique SCAN 25 - CRIGE PACA



4. Faire face à l'érosion et à la submersion

P our faire face à ces phénomènes d'érosion qui mettent en péril l'activité, les biens et les personnes, les premiers ouvrages maritimes de lutte contre l'érosion sont construits dans les années 40 au droit de la ville des Saintes-Maries-de-la-mer, en complément à la Digue à la mer construite en 1914 entre le Petit Rhône et la Ville, sur 4 km de longueur. Ces premiers ouvrages ont eu à l'origine un faible résultat dans la lutte contre l'érosion marine. C'est sur le secteur de la Ville, où finalement le trait de côte a été le mieux tenu (forts enjeux), que l'évolution générale des fonds, combinée à la mise en place progressive d'ouvrages maritimes a conduit à une altération des conditions de transit sédimentaire le long de ce tronçon du littoral.

Une représentation schématique des transits sédimentaires dans le secteur de la Ville des Saintes-Maries-de-la-mer, et de leur évolution, est fournie en figure 3.

Par transit sédimentaire, il faut comprendre : redistribution des sédiments présents et mobilisables sur le littoral, qu'ils proviennent de la disparition du vieux prodelta du Petit Rhône ou des apports du Petit Rhône ou du Grand Rhône (hypothèse à confirmer).

Nous examinons ci-après l'influence des différents ouvrages en présence sur l'évolution du transit littoral :

- ⇒ Le grand épi Ouest construit en 1967 et aujourd'hui disparu (mais le port Gardian joue un rôle semblable d'un point de vue sédimentaire) et le grand épi Est construit en 1970, auront eu pour effet d'aggraver l'érosion aval-transit (c'est à dire à l'est des ouvrages). Le premier sera partiellement détruit pour rendre l'ouvrage perméable au transit.
- ⇒ Le grand brise-lames du Grand large n'a pas permis à ce jour la constitution d'une plage au pied de la digue frontale. A cela deux raisons principales : la digue est très réfléchissante et est donc peu propice au maintien du sable en place ; le transit littoral ouest-est est très réduit à inexistant (nombreux ouvrages se situant amont-transit)
- ⇒ L'épi ouest du Pertuis de la Fourcade, qui avait pour vocation de limiter l'érosion sur sa face l'ouest et de garantir l'ouverture du pertuis, a bien fonctionné. La crainte de l'ensablement du pertuis par l'est conduira à construire un épi est, de moindre longueur. Ces deux ouvrages constituent aujourd'hui, alors que le trait de côte a beaucoup reculé sur ce secteur, un frein aux transits ouest-est.
- ⇒ La disparition progressive de la plage du Clos du Rhône et du Crin Blanc, conduit au renforcement de la Digue à la mer, qui par endroits se trouve les pieds dans l'eau. Compte tenu de la nouvelle configuration des fonds, le transit dominant dans ce secteur s'est inversé ou largement réduit, portant à l'ouest et contrebalancé par une dérive orientée vers l'est par régime de houles de secteur ouest à sud.
- ⇒ La digue ouest du port, intégrée à l'origine du projet dans le dispositif de lutte contre l'érosion du littoral, permet bien d'arrêter les sédiments provenant de l'ouest et donc de favoriser le maintien d'une plage. Mais en conséquence, elle tarit à l'aval (est) le transit sédimentaire (arrêt des sables sur sa face ouest et dispersion des sables dans les profondeurs)

La digue située rive droite de l'embouchure du Petit Rhône avait pour objectif de protéger cette rive de l'érosion et par ailleurs, son orientation (sud-est) devait favoriser la contraction des écoulements du Petit Rhône ce qui jouait un rôle de purge des fonds

de l'embouchure et ainsi favorisait l'évacuation des crues. Ce dispositif devait évoluer par allongement de la digue. Cet ouvrage présente de nombreux inconvénients. En premier lieu, il renvoie les écoulements le long de la digue ouest du Clos du Rhône ce qui peut avoir des conséquences sur sa stabilité ; puis alors que le trait de côte à l'est et à l'ouest sont aujourd'hui nettement "décrochés", les sédiments qui parviennent au littoral lors des crues importantes sont perdus dans les fonds sans que ni le secteur ouest ni l'est n'en bénéficient ; enfin la concentration des écoulements du Petit Rhône en crue doit augmenter son pouvoir abrasif sur le prodelta résiduel.

A l'ouest, sur tout le littoral de la Petite Camargue, le transit moyen prépondérant porte à l'ouest. Les épis dans leur totalité, dont la longueur actuelle a été portée à 100 ou 110 m pour ceux qui ont été rallongés côté terre voire raccordés aux digues frontales, ne sont pas de nature à intercepter une part significative du transit littoral. Dans le secteur on rencontre généralement une barre de déferlement entre 150 et 300 m du rivage, la distance augmentant à mesure que l'on se déplace vers l'ouest. Une illustration est donnée en figure 4 par la situation observée en 1998 sur les photographies aériennes. L'extrémité des épis se trouve loin en deçà de la barre de déferlement qui se situe au-delà d'une fosse de profondeur comprise entre 2 et 6 m, et les fonds se relèvent à 1,5 à 2,5 m sur la barre. C'est sur le système de barre de déferlement que s'effectue l'essentiel du transit sédimentaire longitudinal (le long de la côte) et que se font les échanges barre / plage.

Le raccordement des épis aux digues est nécessaire, car cela constitue le seul moyen de conserver des cellules "contraintes" par les conditions aux limites imposées par les épis et la digue et donc de ralentir le creusement des fonds dans les cellules. Cependant, par régime de houle de sud, sud sud-est ou sud sud-ouest, l'agitation importante et le cloisonnement du littoral favorisent l'exportation des sables des cellules (courants de retour) qui peuvent alors être perdues définitivement pour le système.

Figure 3

EVOLUTION DES DIRECTIONS DES TRANSITS SEDIMENTAIRES
ENTRE LA FIN DU XIX ET DU XX SIECLE

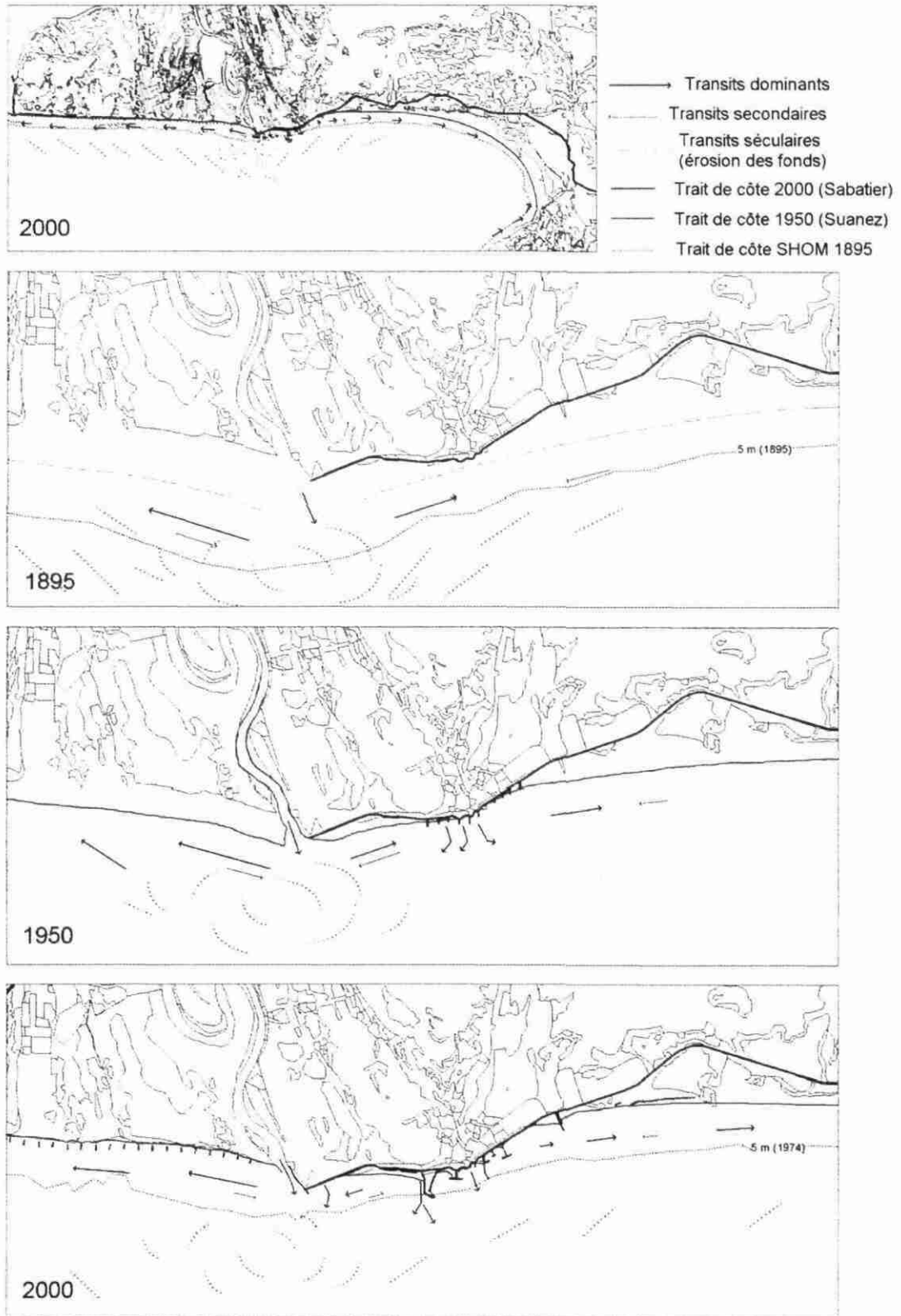


FIGURE 4 (A3)



5. Les facteurs de la submersion

- Les facteurs qui génèrent une submersion marine sont de 3 types :
- des facteurs qui tiennent à la morphologie naturelle de la côte, de son évolution
 - des facteurs qui peuvent réduire cette occurrence, notamment par la présence d'ouvrages de protection
 - les conditions hydrodynamiques particulières (tempêtes)

Les facteurs morphologiques de fragilisation sont :

Le recul du trait de côte et le creusement des fonds, liés au déficit en sédiments

L'arasement ou absence de dunes

Le faible relief à l'arrière de la plage

A l'inverse, l'existence de dunes ou montilles en haut et arrière plage, constituent à la fois une frontière naturelle à l'envahissement des terres et un stock de sable mobilisable lors de périodes de fortes houles et surcotes.

Les facteurs artificiels de protection sont représentés par des interventions (piégeage de sable en haut de plage), ouvrages de protection contre l'érosion marine ou contre l'inondation :

La reconstitution de dunes (ganivelles)

Les ouvrages de première ligne (digues frontales, digues ou levées, épis)

Les ouvrages de seconde ligne

La submersion n'intervient que lorsque des conditions météorologiques particulières et extrêmes règnent sur le littoral. Dans le secteur étudié, ce sont surtout les tempêtes de sud-est qui génèrent les attaques les plus importantes sur la côte. Les facteurs déclencheurs

Les surcotes (niveau maximum atteint par la mer et durée)

Les houles de tempête (amplitude, direction)

5.1. ZONAGE PAR FACTEURS DE FRAGILISATION

5.1.1. A l'est du Petit Rhône

Sur le secteur ouest de la ville des Saintes-Maries, jusqu'au grau d'Orgon (Petit Rhône), le recul du trait de côte s'est poursuivi jusqu'à nos jours ; à l'extrémité ouest le recul a été de 150 m entre 1950 et aujourd'hui et la plage y a disparu sur 600 m. Le recul a été arrêté moyennant un renforcement (et reconstruction) de la digue à la mer sous la forme d'une digue frontale redimensionnée sur 700 m à partir du Petit Rhône (photo 1). De nouveaux ouvrages ont été réalisés en 2002 (photo 2) et d'autres sont prévus à court terme sur ce secteur.

Le recul du trait de côte a été arrêté sur le secteur du village des Saintes par les nombreux ouvrages de défense construits depuis les années 80. Ces ouvrages (épis et brise-lames) reconstituent mal ou modérément des plages (photos 3, 4 et 5). Celles-ci sont soumises malgré tout à une forte dynamique lors des tempêtes.

A l'est de l'agglomération, depuis le centre de thalassothérapie (brise-lames du Grand Large), le bord de mer est constitué d'une digue frontale longue de 600 m (photo 6), jusqu'au Poste de secours N°2, lui-même encerclé par des frontales. Sur ce secteur les plages ont disparu. Pour l'instant les fonds continuent de se creuser.

A l'est, du Poste de secours au pertuis de la Fourcade et jusqu'à la Montille du Gênois (à l'est de l'étang des Batayolles), l'érosion se poursuit. Elle met en péril le Pertuis de la Fourcade (photo 7). Déjà détruite par le passé (tempête de 1982), la digue à la mer sur le secteur du Pont du Rousty est donc encore plus menacée aujourd'hui (recul du trait de côte entre 1992 et 2000 de 30 m)

A l'est du secteur de l'étang des Batayolles (Radeau de la Foux Vieille), la situation est favorable : l'avancée du trait de côte se poursuit.

5.1.2. A l'ouest du Petit Rhône

Sur le secteur ouest (Petit Rhône au Rhône Vif), le recul du trait de côte se poursuit, ralenti par la présence des ouvrages plus ou moins efficaces. En parallèle au phénomène de recul, on assiste au surcreusement important des fonds entre les profondeurs 0 et au moins 20 mètres. Les ouvrages ne sont pas de nature à conserver des profils en équilibre ; le déficit en transit sédimentaire se traduisant par un « décapage » en profondeur du profil, au-delà de la limite d'effet des épis. Seuls les Radeaux sont par nature des secteurs par lesquels l'eau ne peut pénétrer dans les étangs, mais les anciens cordons qui les constituent sont érodés (limite ouest du radeau de Brasinvert). Les cordons dunaires actuels sont quasi inexistantes et de faible altitude ; pour partie ils ont été régénérés suite à la construction de la longue digue construite entre 1979 et 1981 sur le littoral de la CSMSE sur plus de 5 km, prenant appui de proche en proche sur les massifs dunaires existants. Les plages sont basses (au droit des baisses par exemple). Les largeurs de plage sont réduites.

5.2. ZONAGE PAR FACTEURS ARTIFICIELS DE PROTECTION

5.2.1. Les protections douces

Les limites d'utilisation des ganivelles pour la fixation des sables et la reconstitution de dunes ont été malheureusement démontrées sur certains secteurs où elles ont été expérimentées. Par nature, elles ne sont efficaces que pour piéger les sables soufflés par le vent et non pour résister à l'action érosive directe de la mer (photo 8) ; une implantation sur une zone de la plage qui peut être atteinte par la mer est donc vouée à l'échec. Implantées sur les secteurs qui sont le siège d'un recul constant du trait de côte (est et ouest du pertuis de la Fourcade, secteur de la résidence du Crin Blanc, plages au centre du village,...), les systèmes sont à terme ruinés par la mer.

Cependant, sur d'autres secteurs comme le Radeau de Brasinvert et les Quatre-Maries, les ganivelles implantées à l'arrière des digues frontales (photo 9) permettent de piéger le sable et de reconstituer à terme les dunes. Le résultat est une protection accrue contre la submersion lors de tempêtes.

5.2.2. Les protections dures

Ces protections sont assurées par les ouvrages de première ligne qui sont de trois types :

- épis
- digue frontale
- digue de haut de plage

Les brise-lames, ouvrages en mer, ont été à ce jour peu utilisés sur le littoral de la commune ; les seuls exemples sont au nombre de 4, construits en 1984, 1991, 1993 et 2002.

Les épis (photo 10) doivent retenir une partie du transit littoral (transport longshore). Ils permettent en principe de maintenir artificiellement un trait de côte et une plage à un niveau de projet donné. Lorsque les conditions sédimentaires sont particulièrement défavorables, des recharges périodiques doivent être réalisées. On observe sur le secteur étudié des courants de retour forts (>1 m/s) y compris pour des conditions de houle moyenne ; ceci a pour effet d'entraîner vers le large les sables de la plage.

Les premiers épis en enrochements construits sur le littoral étudié l'ont été au droit du village dans les années 1940 à 1950. Ils ont été au nombre de 9. Aujourd'hui ils ont disparu ou ne sont plus fonctionnels ; seuls les vestiges de 4 d'entre eux ont été « reconvertis » lors de la construction de l'épi en T des Arènes, du grand épi Est, petit brise-lames du Grand Large. *Ces anciens épis, orientés N-S de faible longueur 50 à 100 m dont 25 à 80 m en mer, et espacés tous les 100 à 150 m, n'ont donc pas permis d'enrayer le recul du trait de côte, ni de capturer le transit littoral.*

La deuxième phase de construction d'épis se déroule en Petite Camargue essentiellement entre 1984 et 1986, après un premier essai matérialisé par la construction de 3 épis par la CSMSE en 1981 à proximité de la prise d'eau n°2. Cette expérience a été jugée à l'époque concluante compte tenu de la bonne tenue des ouvrages et de la protection apportée lors de la tempête de 1982. Au nombre total de 61, ces épis avaient une longueur de 75 m, dont 50 en mer, étaient espacés tous les 200 m et orientés N-S. Ils ne permettent pas d'enrayer le recul du trait de côte : dès 1989 ils commencent à être contournés par la mer côté plage (« déracinement »). Pour faire face aux risques de submersion les constructions de digues frontales commencent en 1988-89. De 1997 à 1999, 40 épis sont rallongés côté terre et le plus souvent raccordés aux digues frontales lorsqu'elles existent.

Les digues frontales (photo 11) ont pour objectif de soustraire l'arrière plage aux actions de la mer et offrent une bonne résistance à la mer. Elles ont des effets négatifs très marqués sur la plage sous-jacente, dès lors qu'elles induisent une certaine réflexion de la houle sur la pente de l'ouvrage. Plus l'inclinaison de la digue est forte et plus la réflexion de la houle incidente est importante. L'implantation de tels ouvrages en haut de plage conduit à terme dans les secteurs en érosion à une disparition complète de la plage, puis à des affouillements du pied des ouvrages et enfin à la ruine complète si l'entretien n'est pas assuré.

La première digue frontale a été construite au début du siècle au droit du village des Saintes. Il s'agit de la Digue à la mer, construite sur ce secteur pour résister à l'action directe de la mer, la plage ayant totalement disparue dans le secteur des Arènes. Par la suite (années 30) des épis à claire-voie en bois ont complété le dispositif de protection et ont garanti pendant quelques années le maintien de petites plages sur le littoral du village.

Depuis 1980, le littoral du village, allant du Petit Rhône au Pertuis de la Fourcade est protégé par des digues frontales quasi continues.

En petite Camargue, sont d'abord construites :

- en 1988 la digue de la gracieuse (400 m) sur le secteur du Radeau des Deux Pins (CSMSE)
- entre 1989 et 1993 les digues du Grand Radeau, des Quatre-Maries, du Clos de la Comète.

Progressivement, des digues frontales aux caractéristiques diverses sont implantées sur l'ensemble du littoral à l'ouest du Petit Rhône : entre le Radeau de Brasinvert et le Petit Rhône. Plus à l'ouest, et jusqu'au Rhône Vif, la CSMSE intervient tout au long des années 90 en construisant ponctuellement des segments de digues frontales reliant les épis entre eux, s'appuyant sur l'ancienne digue en levadon.

Les digues de haut de plage (photo 12) ont pour objectif d'empêcher le franchissement du haut de la plage par la mer lors de tempêtes avec surcote. Elles offrent une résistance très moyenne à l'action des vagues car elles sont constituées de petits blocs, cailloutis et levadon de sable. Ces digues ont été construites en Petite Camargue entre 1979 et 1981 sur près de 5 km par la CSMSE, entre le Rhône Vif et le Brasinvert dans l'objectif de colmater les brèches et renforcer le cordon dunaire. Elles ont été détruites sur certaines portions, et reconstruites en digue frontale.

Les digues de deuxième ligne (le cas de la Digue à la mer, hors secteurs où elle a été redimensionnée en digue frontale), ne sont pas de nature à s'opposer à l'action directe de la mer agitée. En 1982, la Digue à la mer avait subi de nombreux dommages notamment sur le secteur du Rousty.

Les brise-lames exercent deux types d'actions sur les houles à l'approche du rivage :

- une diminution de l'énergie de la houle par réflexion ou absorption de celle-ci par impact sur l'ouvrage ; l'arrière du brise-lames présente un plan d'eau moins agité (houles résiduelles si franchissement de l'ouvrage)
- une modification de la propagation de la houle aux extrémités du brise-lames (diffraction) ; la houle tourne autour des extrémités et attaque la plage avec une énergie moindre.

Ces ouvrages évitent le déplacement des sédiments vers le large et fixent les fonds. Ils capturent les sédiments se déplaçant le long de la plage ce qui induit une avancée du trait de côte sur la zone d'effet direct de l'ouvrage, mais un recul local aval transit.

Si la longueur du brise-lames est suffisante par rapport à sa distance à la côte, un tombolo peut se créer, la ligne de rivage rejoignant l'ouvrage.

Les brise-lames assurent ainsi une protection directe du rivage par réduction de l'énergie de la houle, et assurent la constitution d'un stock de sable mobilisable lors des tempêtes.

Sur le littoral de la Commune des Saintes, le premier ouvrage de ce type a été implanté en 1984 en face des Arènes avec une variante, à savoir un prolongement vers la terre d'un épi (reconversion d'un ancien épi). L'ancien grand épi Est a été réaménagé en 1991 avec un tenon qui joue le rôle d'un demi brise-lames (photo 5). Deux autres ouvrages (photo 6) sont implantés en 1991 (grand épi en T du Grand Large) et en 1993 (petit brise-lames du Grand Large). En 2002, un brise-lames est construit au sud de Clos du Rhône (photo 2) et un autre est en projet.

6. Critères de qualification de la "vulnérabilité"

Cinq critères sont considérés pour qualifier la "vulnérabilité" à la submersion marine :

- Présence de digues, caractéristiques (enrochements posés en haut de plage, frontale, levadons de sable et cailloutis) et état
- Présence d'épis (enracinés à une digue, contournés,...) et état
- Potentiel de défaillance de l'ouvrage (affouillements, ruine partielle...)
- Evolution récente du trait de côte
- Largeur de la plage (distance à l'ouvrage, à la dune, aux étangs)

L'examen des situations rencontrées sur l'ensemble du littoral conduit à classer les secteurs vulnérables selon une échelle à 5 niveaux :

Niveau 5

- submersion effective en début 2003

Niveau 4

- ouvrage de défense (frontale ou digue) très endommagé
- risque de franchissement (pas de digue) dans un secteur en érosion, plage à faible relief
- recul important du littoral, plage étroite et basse, et pas d'ouvrages de défense ou avec digue de faible cote d'arase.
- frontales sans plage sous-jacente, très exposées aux tempêtes, risques d'affaissement des enrochements, aucune défense naturelle à l'arrière

Niveau 3

- franchissement possible d'une digue de faible cote d'arase
- recul important du littoral, plage large mais basse, et pas d'ouvrages de défense
- digue en enrochements en mauvais état ou de faible cote d'arase
- poursuite du recul du cordon dunaire (poursuite du recul du trait de côte), à terme sa disparition conduit à la submersion
- frontale endommagée et sous cavage
- frontales exposées seules, pas d'épis, exposées à des dislocations d'enrochements
- plages quasi-inexistantes, ouvrages soumis à une forte dynamique

Niveau 2

- digue moyennement exposée (largeur de plage, protection des houles)
- frontale « les pieds dans l'eau », risque à terme si creusement des fonds

Niveau 1

- frontale « solide », à l'avant d'une plage et cordon dunaire

7. Résultat du zonage

Sur le littoral étudié, 29 sites ont été identifiés comme présentant un niveau de vulnérabilité (sensibilité du littoral à la submersion), défini selon l'échelle précédente.

Un code enjeux est également attribué par secteurs. Il correspond à un niveau de gravité en terme de conséquences (vies humaines, économiques, environnementales) de la submersion brutale mais passagère de l'arrière côte :

- code 4 : zones densément habitées (village),
- code 3 : zones présentant un enjeu économique et environnemental fort (Salins), environnemental (RNC), ou pour la gestion des échanges mer/étang (Rousty),
- code 2 : zones ne présentant pas d'enjeux particuliers,
- code 1 : zones sur lesquelles la submersion reste circonscrite (quelques hectares d'arrière plage) et présentent des enjeux faibles.

Le résultat est donné sur le tableau ci-après et l'on se reportera à la planche hors texte.

N° site	Description	Code Subm.	Code Enjeux
1	Contournement possible par l'ouest du fait de l'érosion - submersion des salins (Gard). A l'arrière, Bras mort du Rhône de Saint-Roman, risques sur le Grau du Roi.	4	3
2	Plage étroite - épis contournés - arrière plage bas - seule défense la digue en gros cailloux et blocs (épis 2E - 4E). A l'arrière Clos de la Comète (CSMSE).	3	3
3	A l'arrière des épis 3 à 5 - plage étroite - arrière plage bas - seule défense la digue en gros cailloux et blocs. A l'arrière Clos de la Comète (CSMSE).	3	3
4	Digue frontale "les pieds dans l'eau", aujourd'hui en bon état - risque si démantèlement - entre les épis 6 et 7. A l'arrière Etang de Fer (CSMSE).	2	3
5	A l'ouest de l'ancienne prise d'eau n°2, entre les épis 17-18 - risques si frontale cède (faible largeur de plage). A l'arrière Etang de Fer (CSMSE)	2	3
6	A l'est de l'ancienne prise d'eau n°2, entre épi Fesquet et épi 20 - important recul plage de 40 m entre 2000 et janvier 2003 (épis 19 contourné) - à l'arrière digue construite entre 1979 et 1981 en gros cailloux et blocs. A l'arrière Clos de Brasinvert (CSMSE).	3	3
7	Haut de plage franchissable (sable recouvre enrochements) et franchie - la plage remonte jusqu'aux enrochements en pente douce - si frontale cède. A l'arrière Clos de Brasinvert (CSMSE).	3	3
8	Haut de plage franchissable et franchie - la plage remonte jusqu'aux enrochements en pente douce - épis contournés en janvier 2003 (n°22 et 23) - si frontale cède. A l'arrière Clos de Brasinvert (CSMSE).	3	3
9	Frontale détériorée entre épis n°24 et 25 - creusement de la plage. A l'arrière Radeau de la Grille (CSMSE).	3	3
10	Frontale très bonne tenue entre épis n°25 et 26... si elle conserve ses caractéristiques, ça tient. A l'arrière Radeau de la Grille (CSMSE).	1	3

N° site	Description	Code Subm.	Code Enjeux
11	Frontale les "pieds dans l'eau" entre épis n°26 et 27. Quelques dommages - surverses - fortement exposé aux houles, mais à l'arrière dune. A l'arrière Clos de Brasinvert (CSMSE).	2	3
12	A l'arrière des épis n°28 et 29 - risques sérieux de passage de la mer par-dessus une vieille digue en cailloux/blocs - pseudo frontale de petits enrochements.	3	3
13	Sur la moitié est de la digue Angela - entre les épis n°30 et 31 - passage (traces) par-dessus la digue - la plage remonte jusqu'au couronnement de la digue - risque fort. A l'arrière Clos de Brasinvert (CSMSE).	4	3
14	Extrémité ouest Brasinvert - entre les épis n°31 et 32 - risque si poursuite de l'érosion de la dune.	3	3
15	Radeau de Brasinvert. Plage large, mais basse - à l'arrière ganivelles - mais risque par surcote - à l'avant épis n°34 contourné. (CIAM).	3	1
16	Radeau de Brasinvert Plage large, mais basse - à l'arrière ganivelles - mais risque par surcote - à l'avant épis 34 contourné. (CIAM).	3	1
17	Radeau de Brasinvert. Sur frontale, risques si ouvrages cèdent (plage de largeur très faible) - entre épis 35 et 38. (CIAM).	2	1
18	Extrémité est du Radeau de Brasinvert. Frontale très endommagée - risque ruine - submersion partielle. (CIAM).	4	2
19	Grand radeau. Frontale les "pieds dans l'eau" - ouvrage ruiné - submersion actuelle. (Commune des Saintes).	5	2
20	Grand Radeau (est) entre les épis n°43 à 45 - frontale refaite - risques si ouvrage cède à terme. (Commune des Saintes).	3	2
21	Etang d'Icard - risques (fort recul). Digue de bonne tenue actuellement, cote de couronnement à +1,7 m NGF. Submersion probable par tempête et surcote significative. CIAM.	4	2
22	Digue ouest Clos du Rhône - risques (ouvrage en mauvais état) - risque moyen.	3	3
23	Digue sud Clos du Rhône - risque tant que ouvrages (brises lames complémentaires) non réalisés - destruction possible (affouillements).	3	4
24	Digue face à Crin Blanc - risque modéré si largeur de plage se maintient (plus de 100 m).	2	4
25	Bord de mer du centre des Saintes - plages quasi inexistantes - exposition forte aux houles de sud-est - risques modérés (protection par les ouvrages en mer).	3	4
26	Bord de mer centre des Saintes - plages quasi inexistantes - exposition forte - risques modérés.	3	4
27	Bord de mer est des Saintes - plages inexistantes - exposition très forte - risques moyens. Risque tant que ouvrages (brises lames complémentaires) non réalisés - destruction partielle de la digue possible (affouillements).	4	4
28	Pertuis de la Fourcade - érosion forte - si submersion, impact sur inondation marine par l'est des Saintes.	4	4
29	Pont du Rousty - submersion possible - par ouverture de brèches (encore plus probable que lors de la tempête de 1982).	3	3

8. Rappel des solutions générales envisageables pour le contrôle de l'érosion du littoral

Ne sont déclinées ici que les solutions envisageables sur le site d'étude.

Mesures préventives

Apprécier au plus juste les répercussions sédimentaires néfastes des aménagements envisagés :

- elles peuvent être jugées acceptables si l'aménagement présente un grand intérêt
- elles peuvent être réduites par un complément d'aménagements
- elles peuvent être réduites ou supprimées en modifiant le projet d'aménagement
- elles peuvent conduire à abandonner le projet si aucune solution n'est satisfaisante

Entretien des ouvrages existants : cet entretien régulier consiste à les maintenir dans un état de fonctionnement correct. Il s'agit notamment :

- de réparer les structures endommagées à la suite de tempêtes ou d'événements exceptionnels
- de combler les affouillements ayant pu apparaître au pied d'ouvrages

Mettre en œuvre des mesures de protection des dunes (piétinement, circulation et stationnement de véhicules...), par limitation et canalisation des accès à la plage

Accepter le recul de la ligne de rivage dans les cas où il peut être admis et dès lors prendre des mesures réglementaires (occupation des sols et plan de gestion des zones concernées).

Actions directes sur les sédiments

Ces actions sont classiquement :

- le rechargement en sables de la plage
- la stabilisation et/ou régénération de dunes
- le déversement de sédiments sur les petits fonds
- le (r)établissement d'un transit sédimentaire

Ces actions peuvent être conduites seules ou en accompagnement des constructions d'ouvrages de défense. Elles nécessitent des interventions périodiques ou occasionnelles d'importance variable par rapport à l'intervention initiale selon les pertes sédimentaires enregistrées, acceptables ou non, chroniques ou conjoncturelles (événements exceptionnels).

Réalisation d'ouvrages de défense contre l'érosion marine

L' « arsenal technique » en génie côtier est large. Plusieurs types d'ouvrages ayant démontré leur efficacité contre l'érosion marine peuvent être étudiés :

- ouvrages longitudinaux de haut de plage (appelés "digue frontale" en Camargue)
- ouvrages longitudinaux de bas de plage et de petits fonds (par exemple les brise-lames)
- ouvrages transversaux (épis...)
- combinaison d'ouvrages précédents

9. Préconisations pour le littoral de la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer

9.1. SECTEUR DU VILLAGE

Dans sa configuration actuelle, le littoral du village entre le Petit Rhône et le Pertuis de la Fourcade n'est plus alimenté significativement en sédiments, ni par l'ouest ni par l'est.

La défense du littoral contre la submersion passe par un complément d'aménagements "durs", tant à l'ouest du port qu'à l'est du Grand brise-lames du Grand large. Des aménagements sont en projet sur ces secteurs.

Ces ouvrages devraient atteindre deux objectifs :

- assurer de façon pérenne la protection contre la submersion,
- développer des espaces de sédimentation, protégés des houles (plages artificielles).

Un cloisonnement étudié du littoral doit permettre d'atteindre ces objectifs. Des structures de type brise-lames doivent être étudiées, ou d'autres structures ayant pour effet de réduire fortement l'hydrodynamique (forte dissipation de l'énergie de la houle).

La protection contre les risques de submersion sera mieux assurée si des plages se développent à l'avant de la Digue à la mer ; la stabilité mécanique de celle-ci sera assurée, ce qui est important pour ce "dernier rempart" contre la submersion. Le développement de ces plages artificielles pourra être atteint avec des ouvrages épis en T ou brise-lames.

Le centre du littoral, entre l'épi en T des Arènes et la plage Camille, doit également bénéficier du même traitement.

Dans ce sens, le projet de construction de deux grands épis à l'ouest du Port (secteur de Crin Blanc) doit être ré-étudié. En effet, le type d'ouvrage projeté est indiqué pour intercepter une part du transit littoral, or nous avons montré que ce transit est faible à inexistant. Par ailleurs, ils ne pourront s'opposer aux transferts "crossshore" (perpendiculaire à la côte) et donc à la fuite des sables hors du système.

9.2. PERTUIS DE LA FOURCADE

Une étude particulière devra être faite sur le dispositif "Pertuis de la Fourcade". Aujourd'hui il y a incompatibilité entre le maintien d'un canal pérenne en contact avec la mer et le maintien du trait de côte à l'est. Le maintien de cette ouverture est essentiel pour la gestion des échanges étangs / mer, en temps normal mais également si une inondation par le Rhône touchait l'île de Camargue.

En l'état, l'érosion se poursuivra à l'est du pertuis, mettant en péril l'actuel cordon lors de tempêtes, avec un risque d'ouvertures de brèches et de submersion d'autant plus

grave que la surcote de tempête sera élevée. Cela constitue une menace importante actuelle d'inondation du village par voie latérale et arrière.

9.3. SECTEUR DU PONT DU ROUSTY

Sur ce secteur, le risque de submersion existe. Il s'agit d'un secteur en érosion, proche de la mer et à portée des vagues de tempête (brèches en 1982).

Dans un premier temps, les solutions à mettre en œuvre sont un rechargement de la Digue à la mer sur 500 m (secteur vulnérable) et un rechargement en sable du fond de plage entre le pertuis et la Montille des Charles, en s'assurant du maintien en place de celui-ci (ganivelles, végétalisation) afin de constituer un nouveau massif dunaire. Ce dernier pourra jouer un rôle tampon en cas de forte tempête.

Par ailleurs, le pertuis doit rester fonctionnel et assurer l'évacuation des eaux de l'île de Camargue en cas d'inondation par le Rhône.

9.4. SECTEUR DE L'ETANG D'ICARD

La destruction de la digue rive droite au niveau de l'embouchure du Petit Rhône doit être étudiée.

Une étude détaillée devra déterminer l'évolution probable de l'embouchure : migration en plan avec érosion de l'extrémité est de la plage dite "Quartier du Sauvage".

Une modification du cours extrême-aval du Petit Rhône (by-pass de la boucle du Reculat) doit être étudiée ; on devra notamment s'assurer que les écoulements en période de crues s'effectuent normalement, voire qu'ils améliorent l'hydraulicité. Cette modification aura comme conséquence de déporter naturellement le transport solide du Petit Rhône vers l'ouest, et de favoriser la sédimentation à son embouchure. Des dragages seront sans doute à prévoir (éviter un "bouchon" qui réduirait les écoulements en crue), et un suivi bathymétrique régulier devra être fait. La nature des sédiments présents à l'embouchure devra être déterminée et l'on vérifiera s'ils sont compatibles (qualité) avec une utilisation à des fins de rechargement des plages.

Différentes options seront à étudier :

- Dépôt à l'arrière du trait de côte de ce secteur, s'il s'agit de fines.
- Rechargement des plages à l'ouest ou à l'est du Petit Rhône, si la proportion de sables est compatible.

9.5. SECTEUR DU GRAND RADEAU AU RHONE VIF

Sur ce secteur un dispositif global doit être étudié, en continuant d'assurer de la bonne tenue des ouvrages actuels.

Ce dispositif est basé sur une gestion du transit sédimentaire, dont l'ordre d'intervention est inverse au sens du transit. L'excédent de sable accumulé à la Pointe de l'Espiguette ne fait que s'accroître d'année en année. Cet excédent peut être intercepté en cours de route, tout d'abord sur la partie littorale du Gard, avec pour effet de favoriser l'ensablement des secteurs de ce littoral touchés par l'érosion et notamment le fragile cordon qui sépare le bras mort du Rhône de Saint-Roman de la

mer. Depuis un siècle, le point d' "équilibre" entre secteur en érosion (à l'est) / secteur en engraissement (à l'ouest) se situe à mi-chemin entre le phare de l'Espiguette et Les Baronnets. On devrait étudier les moyens d'intercepter le transit sédimentaire avant qu'il n'atteigne l'Espiguette. Parmi ces moyens, nous pouvons imaginer une série de digues-épîs. Pour mémoire, d'autres systèmes peuvent également être proposés : systèmes de gros brise-lames ou atténuateurs de houles implantés à une grande distance de la côte (500 à 1000 m).

A titre d'illustration, nous développons ici l'hypothèse de digues-épîs. Une digue similaire (à adapter) à celle implantée à la Pointe de l'Espiguette aurait des effets similaires à ceux induits par la digue de l'Espiguette : sédimentation à l'est, mais avec érosion à quantifier à l'ouest (phase transitoire). De proche en proche, un deuxième ouvrage implanté entre Les Baronnets et "La Capelude", compléterait le dispositif dès que l'ouvrage précédent aura agi (digue saturée en sable). Enfin la digue est de la prise d'eau n°1 des salins pourra être prolongée afin de remplir la même fonction.

Bien sûr, le dimensionnement (longueur en mer des ouvrages) et le positionnement exact devra se faire en se basant sur une étude de l'impact sédimentaire de ces ouvrages sur les secteurs situés à l'ouest et sur la capacité des ouvrages à intercepter le transit aux fins d'avancée significative du trait de côte à l'est de ceux-ci.

Toute intervention sur le littoral de Petite Camargue qui se traduirait par une interception significative du transit sédimentaire (par exemple si on rallongeait les épîs), et qui serait menée avant la consolidation du littoral à l'ouest, aurait comme conséquence l'aggravation de l'érosion à l'ouest du lieu de cette intervention. Elle fragiliserait encore plus le secteur situé à l'ouest du Rhône Vif, le fragile cordon qui protège le Bras Mort du Rhône de St Roman et donc le Grau du Roi. Une extension des épîs vers la mer, afin d'atteindre la barre de déferlement, ne saurait se faire sans une étude qui déterminera la longueur et l'espacement optimal de ces ouvrages.

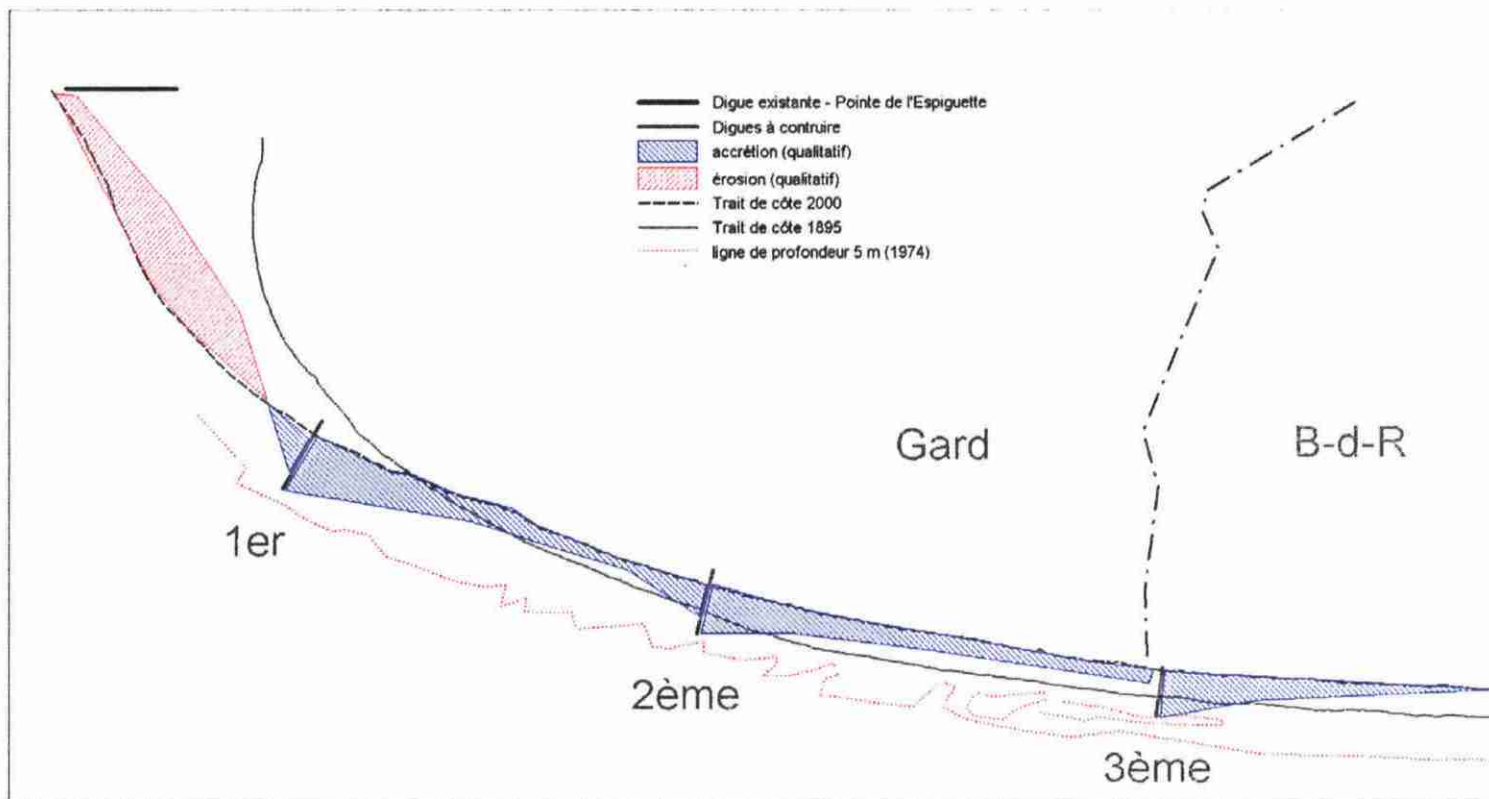
Une représentation schématique du principe d'intervention à l'ouest du Rhône Vif est fournie en figure 5.

9.6. ACTIONS SUR LES APPORTS SOLIDES DU PETIT RHONE

L'objectif serait d'augmenter les apports solides transitant dans le Petit Rhône, en favorisant d'une part sa capacité de transport (pente du cours d'eau), et l'augmentation des débits qui transitent en moyenne et en crue. Cette solution doit être étudiée en considérant la part des transports solides du Rhône à l'amont de la défluence qui pourraient être capturés par le Petit Rhône, et la qualité de ceux-ci (fines, sables...). Par ailleurs, les conditions d'écoulement doivent être étudiées (ne pas arriver à des débordements plus fréquents), ou les travaux de recalibrage qui seraient nécessaires (tenue des digues, relever les sommets des digues...). Ces actions doivent s'appuyer sur les résultats de l'étude globale pour une stratégie de réduction des risques dus aux crues du Rhône dans sa partie delta, et tout particulièrement à travers les scénarios de rescindements du lit du Petit Rhône.

Figure 5

Schéma de principe de l'aménagement ouest Camargue (situation finale qualitative)



ANNEXE 1

Photographies



Photo 1 : digue frontale "Camping Clos du Rhône" (Digue à la Mer)



Photo 2 : digue frontale "Camping Clos du Rhône" et brise-lames (2002)



Photo 3 : plage et ouvrages de protection sur le littoral des Arènes



Photo 4 : ouvrages de protection sur la plage Camille (absence de plage)



Photo 5 : ancien grand épi Est, restauré en partie avec son tenon. Plage étroite



**Photo 6 : digue frontale à l'est du village, au premier plan le petit brise-lames, au second plan le grand brise-lames du Grand large (épi de connexion à la digue).
Absence de plage**



Photo 7 : mince cordon dunaire et plage étroite à l'est immédiat du pertuis de la Fourcade



Photo 8 : ganivelles sur la plage à l'est du port Gardian, exposées à la mer.



Photo 9 : ganivelles sur 200 m de longueur dans le secteur des Quatre-Maries à l'arrière d'une digue frontale

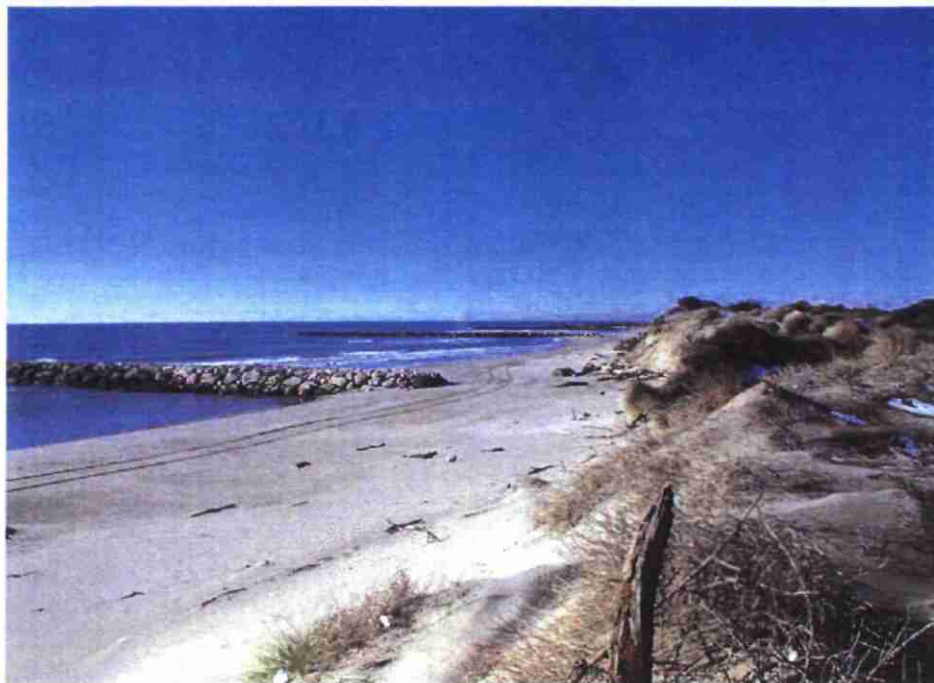


Photo 10 : ouvrage type "épi" (n°32 au premier plan) ; à l'arrière cordon dunaire.

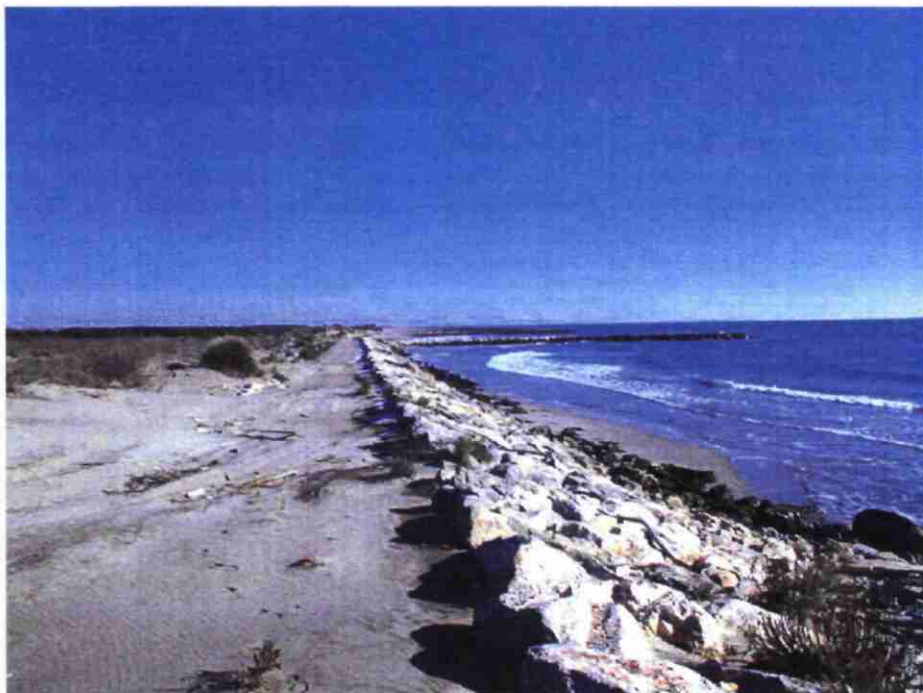


Photo 11 : ouvrage type "digue frontale" ; au fond épis n°28 et 29 raccordés à la digue

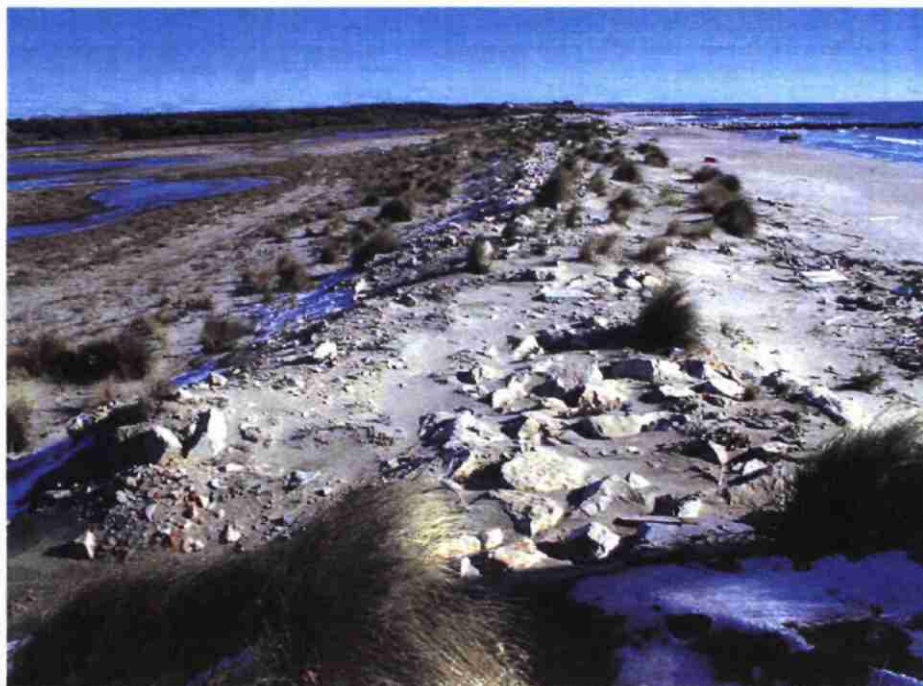


Photo 12 : digue Angela, ouvrage type "digue de haut de plage" (ici peu efficace) ; au fond épis n°30 et 31

ANNEXE 2

Apports de la modélisation météorologique pour la prévision des tempêtes (houles et surcotes)

Le modèle de prévision météorologique des houles fonctionne en routine et fournit de bonnes prévisions sur l'état de la mer à des échéances variables (t+6h, t+12h, t+24h...).

La faisabilité de la prévision des surcotes a été étudiée en prenant comme champ de modélisation l'ensemble de la Méditerranée occidentale (Météo France). Développée outre-mer (cyclones), et sur la façade Atlantique, le modèle a été mis en œuvre en Méditerranée, pour 5 événements de tempête récents :

- du 1 au 12 janvier 1994
- du 10 au 14 novembre 1996
- du 7 au 29 décembre 1997
- du 16 au 26 septembre 1999
- du 24 au 30 décembre 1999

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).

Un exemple de la modélisation est fourni en figure 7 avec l'événement de décembre 1997.

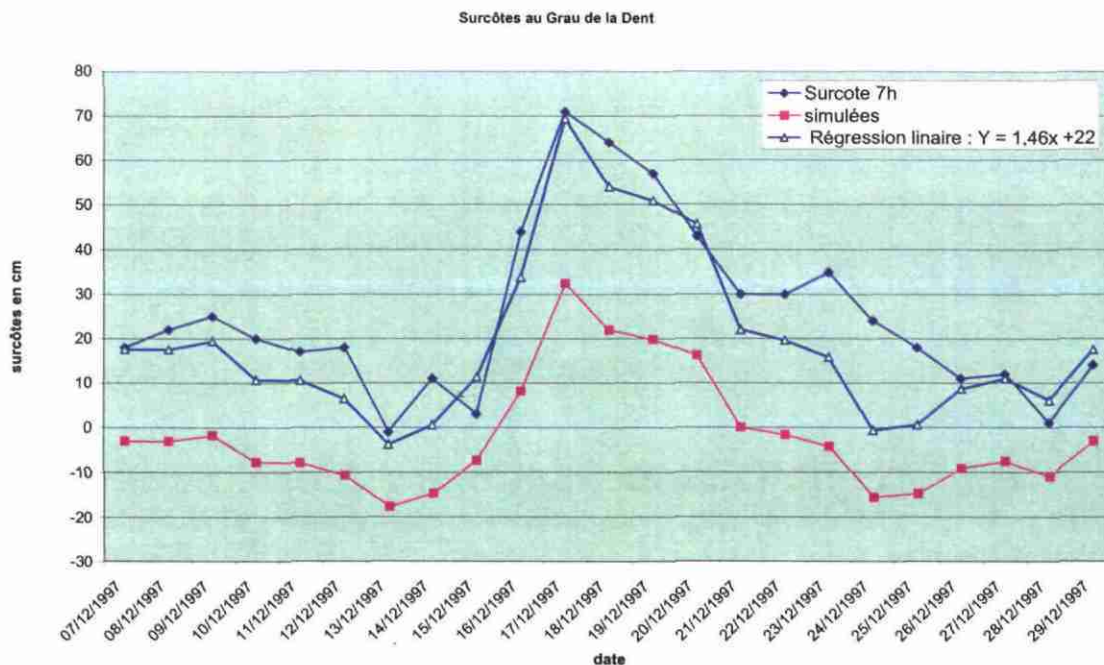


Fig. 7 - Surcotes modélisées et observées du 7/12/1997 au 29/12/1997 au Grau de la Dent (Météo-France / DIRSE)

Cet exemple indique que, moyennant la correction linéaire, le phénomène de surcote a été bien modélisé, notamment son maximum. Ainsi, la poursuite de ce type d'étude permettrait de s'assurer de la validité de ce modèle, de définir une correction systématique représentative de la plupart des événements, voire d'affiner le modèle pour éviter d'avoir recours à la correction linéaire.