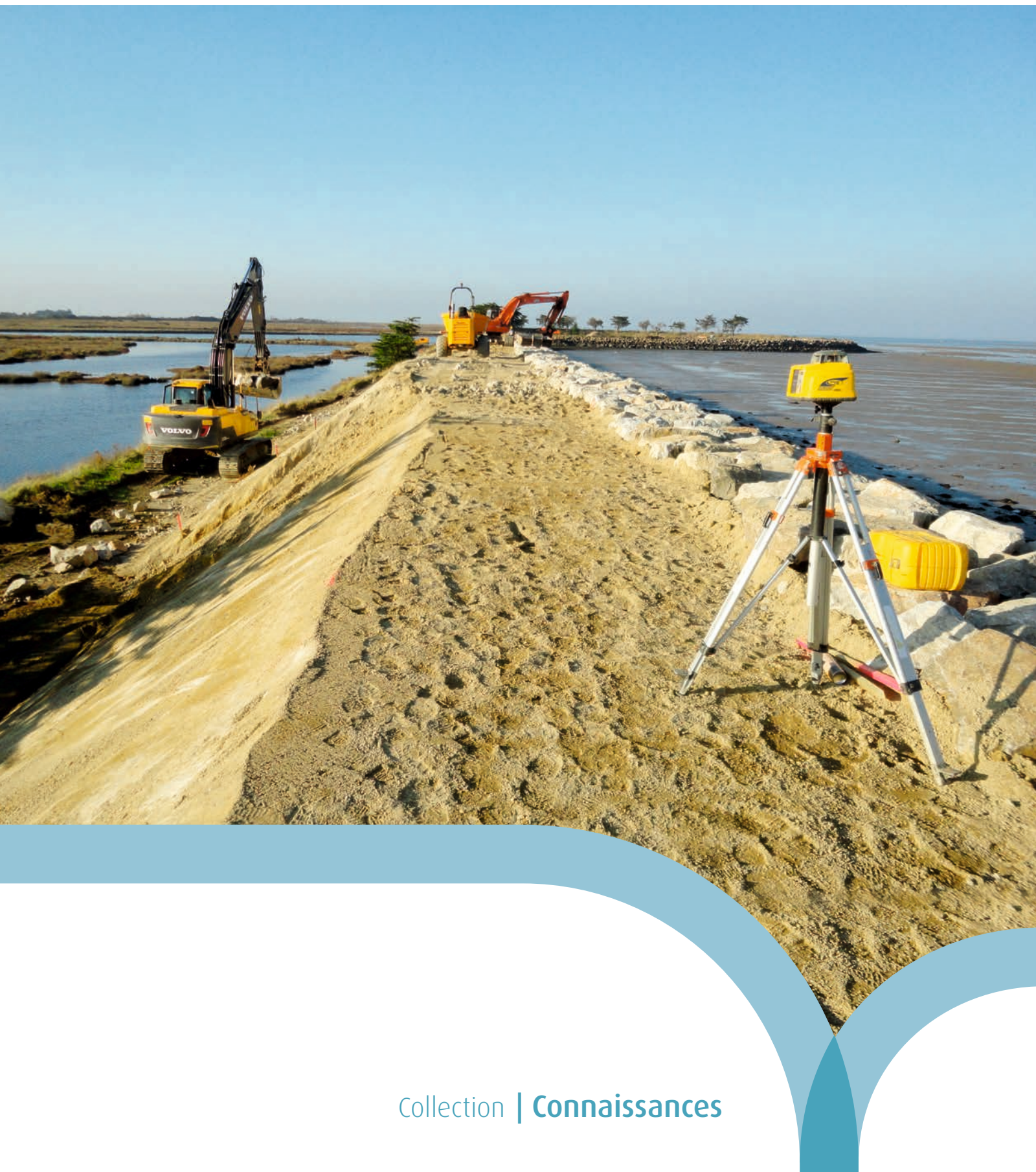


Coût des protections contre les aléas littoraux



Coût des protections contre les aléas littoraux

Collection | **Connaissances**

Comment citer cet ouvrage :

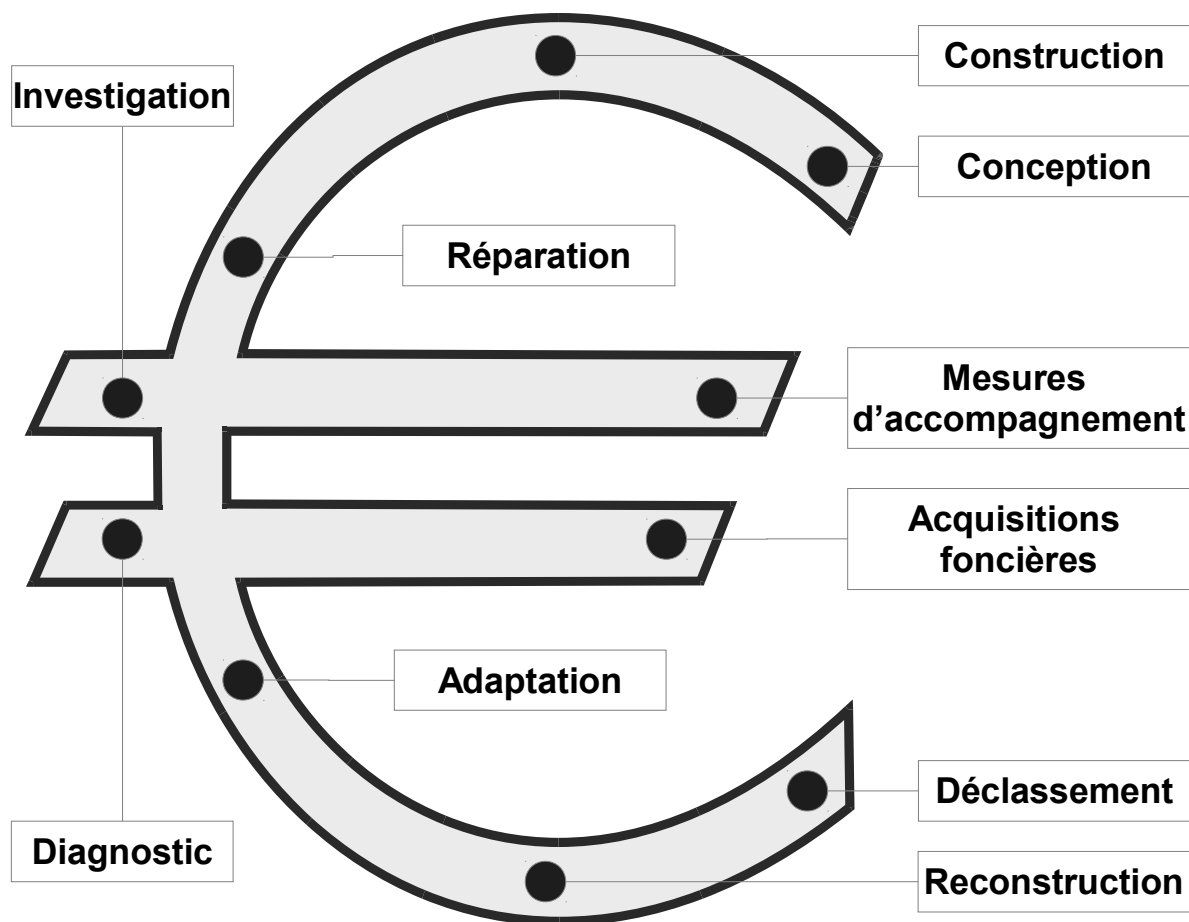
Cerema. Coût des protections contre les aléas littoraux.

Cerema, 2018. Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-283-4 (imprimé)

Édition Cerema

Cerema Eau, mer et fleuves – 134, rue de Beauvais – CS 60039 – 60280 Margny-lès-Compiègne Tél : +33(0)3 44 92 60 00

Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél : +33 (0)4 72 14 30 30



Préface

Plages et dunes, polders et marais côtiers, estuaires et deltas... Les formes du littoral français sont multiples mais ont en commun leur caractère évolutif. Ainsi, bien que les XIX^e et XX^e siècles aient consacré dans le domaine terrestre l'emploi des techniques de génie civil pour l'aménagement du territoire, cette instabilité morphologique a fortement remis en cause la pérennité des constructions lorsque la fonction de protection contre les aléas littoraux leur a été attribuée. Sur le long terme, il est en outre apparu que les digues et ouvrages de génie civil fixant le trait de côte étaient susceptibles de modifier ou d'impacter les processus et milieux naturels et présentaient le plus souvent une efficacité limitée et un coût global très élevé.

Bénéficiant de ces retours d'expérience, les politiques publiques, longtemps trop détachées de la réalité du fonctionnement hydrosédimentaire des sites, intègrent désormais davantage les processus naturels. Les stratégies d'intervention récemment adoptées montrent également une plus grande diversité dans les modes d'action et une véritable projection dans l'avenir avec un volet de gestion et d'entretien en prolongement de la phase d'investissement.

Le paysage des interventions sur le littoral est donc en pleine mutation en ce début de XXI^e siècle. Néanmoins, en cette période de transition, les acteurs en charge de la définition de ces nouvelles orientations manquent de repères quant au coût des nouvelles stratégies envisageables, comparées avec les stratégies traditionnelles de « défense contre la mer ».

L'ambition de ce document est de restituer aussi fidèlement que possible l'organisation et le montant des dépenses afférentes aux multiples opérations entreprises au cours des quinze dernières années pour servir de références à la définition de nouvelles opérations. Au-delà de la présentation des coûts, ce guide offre une mise en perspective des opérations dans leur contexte et nous espérons ainsi qu'il aidera ses utilisateurs à faire les meilleurs choix d'aménagement.

Cet ouvrage est une œuvre collective éditée sous la direction du Cerema.

COORDONNATEUR ET RÉDACTEUR

Marc Igigabel (Cerema)

CONTRIBUTEURS

Natacha Christin, Delphine Rouchon, Doris Nicklaus (CGDD)

Loïc Gouguet (ONF)

Hugues Heurtefeux (EID)

Thibaut Mallet (Symadrem)

Mohamed El Fadili, Virginie Chaouch, François Hédou, Reine Tarrit (Cerema)

RELECTEURS

Yann Deniaud, Julian David, Joël L'Her, Olivier Piet (Cerema)

Doris Nicklaus, Delphine Rouchon (CGDD)

REMERCIEMENTS

Le programme Barcasub relatif à la protection du bassin Arcachon et financé par le Medde/Liteau a apporté des éléments de comparaison très utiles.

Toutes les personnes ayant contribué au recueil des données sont vivement remerciées. Leur liste est présentée ci-après par type de service.

Directions d'administration centrale du ministère de la Transition écologique et solidaire

Jean-Philippe Lalande et Mikaël Prévost (DGPR)

Directions régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL)

Laurent Montel (DREAL Occitanie)

Marie-Christine Barbeau (DREAL Nouvelle-Aquitaine)

Ludovic Bocquier (DREAL Pays de la Loire)

Gérard Prigent (DREAL Bretagne)

Directions départementales des Territoires et de la Mer (DDTM)

Christian Brandli (DDTM13)

Damien Levallois (DDTM14)

Serge Halioua (DDTM 17)

Julien Margo et Antoine Lesdos (DDTM 50)

Carine Klamka et Stéphane Ansart (DDTM 62)

Pierre Faguet (DDTM 85)

Conseils départementaux (CD)

Sébastien Puyeo et William Proust (CD 17)

Michel Cornic (CD 29)

Alexandre Richard et Stéphane Loubié (CD 34)

Loïc Le Louargant (CD 76)

Séverine Gambart (CD 85)

Communes et Communautés de communes

Patrick Armenio et Yvon Iziquel (Thau Agglo)

Patricia Ferdier (Le Grau-du-Roi)

Valentina Cosma et Sylvie Berthomieu (Communauté d'agglomération du Pays de l'Or)

Sophie Draï (Communauté d'agglomération Hérault Méditerranée)

Alain Doré (ville de la Baule)

Olivier Fouquet et Clément Rataud (Communauté de communes de l'île de Noirmoutier)

Anne-Gaël Daniel (service environnement, Challans Gois Communauté)

Frédérique Bianchi (ville de Cannes)

Magali Pontier (ville d'Hyères)

Françoise Ecureux (maire de Gêfosse-Fontenay)

Syndicats mixtes

Eve Ageorges (Syndicat du littoral Yves-Châtelailon-Aix-Fouras)

Julie Lowenbruck (Syndicat Mixte du marais Poitevin bassin du Lay)

Bureaux d'études

Yann Gasowski (Artelia)

Résumé

Le Commissariat général au développement durable (CGDD) a engagé une démarche globale relative à l'analyse multicritère dans le but d'éclairer la prise de décision portant sur les aménagements de protection contre les inondations fluviales et les aléas littoraux. La présente étude est destinée à servir de référence pour l'évaluation du coût des aménagements littoraux. Elle est le pendant, dans le domaine côtier, de l'étude de coût des protections contre les inondations fluviales (Cerema, 2014).

Le calcul du coût global actualisé intègre les coûts initiaux d'investissement et les coûts d'entretien et de gestion. Ce principe général de calcul a été confronté aux deux stratégies d'intervention qui s'appliquent, distinctement ou conjointement, sur nos espaces côtiers :

- la gestion du trait de côte ;
- la gestion des systèmes d'endiguement.

Les interventions liées à ces deux stratégies correspondent à deux ensembles qui se recoupent partiellement. Néanmoins, en cohérence avec l'organisation actuelle des politiques publiques, une première connaissance des coûts peut être acquise en adoptant ces deux grilles de lecture.

Pour approfondir le sujet, une attention particulière doit être portée aux cycles de vie des structures, ces cycles impliquant des « rythmes de dépenses » différents influençant fortement le calcul des coûts globaux actualisés. Ainsi, dans un second temps, le guide s'intéresse aux coûts de divers types d'interventions, qui peuvent être réalisées seules ou dans le cadre de projets associant plusieurs d'entre elles, et qui concernent :

- le rechargement de plage ;
- la création, la réhabilitation ou l'entretien des cordons dunaires ;
- la construction, le renforcement ou l'entretien des digues ;
- la construction, le renforcement ou l'entretien des ouvrages de génie civil (les perrés, les murs et ouvrages de soutènement, les épis, les brise-lames et butées).

Dans chacun des cas, sur la base de rapports pluriannuels d'investissement, de budgets de fonctionnement et de marchés de travaux, sont présentées des estimations :

- **des dépenses d'investissement.** Il s'agit de dépenses linéaires (valeurs calculées pour des projets globaux ou des structures particulières) ;
- **des dépenses d'entretien et de gestion.** Il s'agit de moyennes annuelles linéaires (valeurs calculées notamment pour les digues, les dunes et certains dispositifs de rechargement de plage) ;
- **du coût des interventions.** Il s'agit soit de coûts linéaires globaux, soit de coûts surfaciques, volumiques ou massiques se rapportant aux différentes techniques.

En dernière partie, les coûts observés sur les différents types d'ouvrages font l'objet d'une analyse transversale par techniques d'intervention.

Enfin, en annexe figurent les tableaux présentant les données collectées sur chacune des opérations de travaux.

Mots-clés : coût, protection, défense, mer, submersion, érosion, digue, dune, plage

Abstract

The French Ministry of Ecology, Sustainable Development and Energy engaged a global approach relative to the multicriteria analysis to help the decision making concerning coastal and riverine protection structures. The present study is intended to serve as reference for the cost estimates of coastal structures. It is the equivalent, in the coastal domain, of the cost study on riverine flood protection (Cerema, 2014).

The calculation principle of the present global cost takes into account initial costs and management and maintenance costs. This general calculation principle was confronted with two intervention strategies which apply separately or jointly to our coastal spaces :

- a strategy of integrated coastline management,
- a strategy of protection against marine floods.

Interventions in relation with these two strategies correspond to two sets that overlap partially. Nevertheless, in coherence with the current organization of the public policies, a first knowledge of the costs can be acquired by adopting these two keys for understanding.

To elaborate on the subject, a particular attention was paid on structure life cycles because these cycles imply different expenditure rythms that strongly influence the calculation of present global costs. So, the guide deals successively with the costs of diverse interventions types, which can be realized separately or within the framework of projects associating several of them:

- beach nourishment,
- dune creation, rehabilitation or maintenance,
- levee construction, reinforcement and maintenance,
- civil engineering construction, reinforcement and maintenance (seawalls, walls and supporting structures, groynes, breakwaters, abutments).

In each case, on the basis of multiannual investment reports, operating budgets and construction contracts, the report presents estimations concerning :

- **investments expenditures.** Linear average costs are estimated for global projects or for particular structures,
- **maintenance and management expenditures.** Annual linear average costs are estimated especially for levees, dunes and some beach nourishment devices,
- **intervention costs** : global linear costs are estimated. Furthermore, surface, volume or mass costs are estimated for different techniques.

In the last part, costs observed on the various works types are analysed in a transversal way, by intervention techniques.

Lastly appendices present data collected on the interventions.

Key-words : cost, protection, defense, sea, flood, erosion, levee, dune, beach

Table des matières

Préface	3
Résumé	6
Abstract	7
Présentation générale de l'étude	12
CONTEXTE DE L'ÉTUDE	12
OBJECTIFS DE L'ÉTUDE	13
FORME DE RESTITUTION DE L'ÉTUDE	14
DESTINATION DE L'ÉTUDE	16
MODE D'ÉLABORATION DE L'ÉTUDE	16
1. Évaluation du coût global actualisé d'un projet	19
1.1 STRATÉGIES DE GESTION DES ALÉAS LITTORAUX	19
1.1.1 Aléas littoraux	19
1.1.2 Stratégies d'intervention : principes généraux	20
1.2 PRINCIPE DE CALCUL DU COÛT GLOBAL ACTUALISÉ	22
1.3 SÉQUENCE DE CALCUL DU COÛT GLOBAL ACTUALISÉ	24
1.4 INFORMATIONS DÉLIVRÉES PAR LE PRÉSENT RAPPORT SUR LES COÛTS	26
1.5 AUTRES INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR LES DURÉES DE VIE, LES COÛTS ET LES FRÉQUENCES D'ENTRETIEN DES STRUCTURES	28
2. Types d'aménagements, effets attendus et évolution dans le temps	30
2.1 FORMATIONS NATURELLES OU PARTIELLEMENT ANTHROPISES (PLAGES ET CORDONS DUNAIRES)	30
2.1.1 Principes généraux d'intervention	31
2.1.2 Adaptation au changement climatique	34
2.2 OUVRAGES FORMANT LES SYSTÈMES D'ENDIGUEMENT	35
2.2.1 Formes et fonctions des digues	35
2.2.2 Adaptation au changement climatique	37
2.3 OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL	37
2.3.1 Formes et fonctions des ouvrages de génie civil	37
2.3.2 Adaptation au changement climatique	41
3. Méthodologie d'analyse des coûts observés	42
3.1 UNE MÉTHODOLOGIE DIFFÉRENCIÉE PAR TYPE D'OPÉRATION	42
3.2 CADRES D'ANALYSE DÉDIÉS AUX OPÉRATIONS GLOBALES	43
3.2.1 Analyse des opérations de gestion du trait de côte	43
3.2.2 Analyse des projets de protection contre les submersions marines	43
3.3 CADRES D'ANALYSE DES MARCHÉS DE TRAVAUX	44
3.3.1 Valeurs recherchées au travers de l'analyse	44
3.3.2 Classification des opérations	45
3.3.3 Mode opératoire d'analyse des données	46
3.3.4 Forme de la restitution des résultats	48
3.3.5 Facteurs influençant les coûts	48

4. Coûts observés sur les opérations globales de gestion du trait de côte	51
4.1 ANALYSE COMPARATIVE DU COÛT GLOBAL DES STRATÉGIES D'AMÉNAGEMENT	53
4.2 COÛTS D'INVESTISSEMENT DES OPÉRATIONS DE GESTION DU TRAIT DE CÔTE INTÉGRANT UN VOLET TERRESTRE	56
4.2.1 Réhabilitation du lido de Sète à Marseillan	56
4.2.2 Réhabilitation du lido de Petit Travers	58
4.2.3 Reconstitution du cordon dunaire et de la plage de Vias	60
4.3 COÛTS D'INVESTISSEMENT DES OPÉRATIONS DE GESTION DU TRAIT DE CÔTE SANS VOLET TERRESTRE	62
4.3.1 Mise en valeur du lido de Frontignan	62
4.3.2 Mise en valeur du littoral de Valras Vendres	63
4.3.3 Restauration de l'espace littoral à Villeneuve-lès-Maguelone	66
4.3.4 Confortement du front de mer de Capbreton	66
4.4 COMPARAISON ET SYNTHÈSE DES COÛTS D'INVESTISSEMENT DES OPÉRATIONS DE GESTION DU TRAIT DE CÔTE	68
4.4.1 Récapitulatif des coûts d'investissement	68
4.4.2 Comparaison et synthèse des coûts linéaires	72
 5. Coûts observés sur les opérations globales de protection contre les submersions marines	 76
5.1 DES ÉVOLUTIONS RÉCENTES INFLUENÇANT LES COÛTS	76
5.1.1 Les évolutions réglementaires	76
5.1.2 Xynthia : une tempête qui change la donne	77
5.2 DÉPENSES OBSERVÉES À L'ÉCHELLE NATIONALE SUR LES PROGRAMMES D' ACTIONS GLOBAUX	78
5.3 DÉPENSES D'INVESTISSEMENT CONSACRÉES AUX MESURES STRUCTURELLES SUR CINQ SITES EMBLÉMATIQUES	80
5.3.1 Dépenses d'investissement sur l'Île de Noirmoutier	80
5.3.2 Dépenses d'investissement sur Yves et Châtelailon-Plage	81
5.3.3 Dépenses d'investissement sur Aytré et Angoulins	83
5.3.4 Dépenses d'investissement sur l'Île de Ré	84
5.3.5 Dépenses d'investissement sur le Pouliguen	85
5.4 ANALYSE COMPARATIVE DES DÉPENSES OBSERVÉES SUR LES CINQ SITES	86
5.5 COMPARAISON ET SYNTHÈSE DES DÉPENSES RAPPORTÉES AU LINÉAIRE DE PROTECTION	87
 6. Coûts observés sur les rechargements de plage, le transfert hydraulique et les drains de plage	 90
6.1 COÛTS OBSERVÉS SUR LE RECHARGEMENT DE PLAGE	90
6.2 COÛTS OBSERVÉS SUR LE SYSTÈME DE TRANSFERT HYDRAULIQUE (BY-PASS)	94
6.2.1 Dépenses d'investissement	95
6.2.2 Dépenses de fonctionnement et d'entretien	95
6.3 COÛTS OBSERVÉS SUR LES DRAINS DE PLAGE	96
6.3.1 Dépenses d'investissement	97
6.3.2 Dépenses de fonctionnement et d'entretien	97
 7. Coûts observés sur les cordons dunaires	 98
7.1 DÉPENSES DE GESTION ET D'ENTRETIEN	99
7.1.1 Dépenses annuelles observées sur la façade Atlantique	100
7.1.2 Synthèse sur la façade Atlantique et extrapolation sur la façade méditerranéenne	105

7.2	COÛTS DES OPÉRATIONS PARTICULIÈRES DE CRÉATION OU DE RÉHABILITATION	107
7.2.1	Création des cordons dunaires	107
7.2.2	Réhabilitation et confortement des cordons dunaires	109
7.3	COÛTS DÉTAILLÉS DES TECHNIQUES	110
7.3.1	Rechargement, remodelage, reprofilage de dunes	110
7.3.2	Végétalisation et couvertures	110
7.3.3	Ganivelles	111
7.3.4	Brise-vent en fibre de coco	113
7.3.5	Clôtures	114
8.	Coûts observés sur les systèmes d'endiguement (en particulier les digues)	115
8.1	INFLUENCE DU MARNAGE ET DE L'EXPOSITION AUX VAGUES ET AUX COURANTS	116
8.1.1	Influence du marnage sur le coût des digues	116
8.1.2	Influence de l'exposition aux vagues et aux courants sur le coût des digues	120
8.2	COÛTS OBSERVÉS SUR LES DIGUES AVEC PAREMENT	121
8.2.1	Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection	122
8.2.2	Coûts observés sur les opérations de confortement	128
8.2.3	Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation	134
8.3	COÛTS OBSERVÉS SUR LES DIGUES SANS PAREMENT	140
8.3.1	Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection	140
8.3.2	Coûts observés sur les opérations de confortement	141
8.3.3	Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation	143
8.4	PARTS DES PRESTATIONS INTELLECTUELLES ET DES ACQUISITIONS FONCIÈRES DANS LE COÛT D'INVESTISSEMENT	143
8.5	DÉPENSES LINÉAIRES ANNUELLES MOYENNES DE GESTION ET D'ENTRETIEN	146
8.5.1	Exploitation des budgets d'entretien et de gestion	147
8.5.2	Évaluation des dépenses d'entretien en pourcentages du coût d'investissement	149
9.	Coûts observés sur les ouvrages de génie civil (perrés, murs et ouvrages de soutènement, épis, brise-lames et butées)	154
9.1	COÛTS OBSERVÉS SUR LES PERRÉS	154
9.1.1	Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection	155
9.1.2	Coûts observés sur les opérations de confortement	157
9.1.3	Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation	157
9.2	COÛTS OBSERVÉS SUR LES MURS ET OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT	158
9.2.1	Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection	159
9.2.2	Coûts observés sur les opérations de confortement ou de rehausse	163
9.2.3	Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation	164
9.3	COÛTS OBSERVÉS SUR LES ÉPIS	165
9.3.1	Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection	165
9.3.2	Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation	169
9.4	COÛTS OBSERVÉS SUR LES BRISE-LAMES EN ENROCHEMENTS OU EN GÉOTUBES	169
9.4.1	Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection	170
9.4.2	Coûts observés sur les opérations de confortement	172
9.4.3	Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation	173
9.5	COÛTS OBSERVÉS SUR LES BUTÉES DE PIED EN ENROCHEMENTS OU EN GÉOTUBES	174
9.5.1	Coûts observés sur les opérations de construction de butées de bas de plage	175
9.5.2	Coûts observés sur les opérations de construction de butées de pied de dune	175

9.6	DÉPENSES LINÉAIRES ANNUELLES MOYENNES EN GESTION ET ENTRETIEN OBSERVÉES SUR LES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL	176
9.6.1	Exploitation des budgets d'entretien et de gestion	176
9.6.2	Évaluation des dépenses d'entretien en pourcentages du coût d'investissement	177
10.	Analyse transversale des coûts observés sur les différents types d'intervention	180
10.1	OBJET DE CETTE SYNTHÈSE	180
10.2	SYNTHÈSE DES COÛTS GLOBAUX	180
10.2.1	Coûts linéaires de construction, reconstruction ou réfection	181
10.2.2	Coûts linéaires de confortement	184
10.2.3	Coûts linéaires d'entretien	186
10.2.4	Coûts linéaires annuels de gestion et d'entretien	188
10.3	SYNTHÈSE DES COÛTS PAR TECHNIQUE (OU MATÉRIAU)	189
10.3.1	Coûts surfaciques (maçonnerie, béton, gabions)	189
10.3.2	Coûts volumiques (terre, béton, bois)	190
10.3.3	Coûts massiques (enrochements)	192
11.	Références	194
	ANNEXE A - DONNÉES ENREGISTRÉES ET DONNÉES ISSUES DES CALCULS	196
	ANNEXE B - TABLEAU DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX PLAGES	198
	ANNEXE C - TABLEAU DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX CORDONS DUNAIRES	204
	ANNEXE D - TABLEAUX DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX DIGUES	208
	ANNEXE E - TABLEAUX DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX PERRÉS	225
	ANNEXE F - TABLEAUX DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX MURS ET OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT	229
	ANNEXE G - TABLEAUX DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX ÉPIS	234
	ANNEXE H - TABLEAUX DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX BRISE-LAMES ET BUTÉES	239

Présentation générale de l'étude

CONTEXTE DE L'ÉTUDE

L'étude est menée en réponse à un contexte particulier d'évolution des stratégies de protection contre les aléas littoraux.

Ainsi, si l'on considère schématiquement les deux principaux types de littoraux sur lesquels les interventions sont menées¹ :

- sur les littoraux de plages et de dunes, dans la seconde moitié du XX^e siècle, des aménagements de grande ampleur ont été engagés, notamment pour accompagner le développement du tourisme balnéaire ou pour les aménagements portuaires. Ces aménagements « en dur » ont souvent produit un démaigrissement des plages et des dunes qui constituaient le rempart naturel face aux aléas. Partant de ce constat, des recommandations ont été établies visant une gestion durable du trait de côte (MEEDDM, 2010) et une inflexion est désormais clairement perceptible sur le terrain où sont mises en œuvre des solutions basées sur une meilleure compréhension du fonctionnement hydrosédimentaire du littoral ;
- sur les littoraux de polders et marais côtiers, la tempête Xynthia a mis en évidence le 28 février 2010 la nécessité d'améliorer la performance de nos systèmes d'endiguement pour mieux se protéger contre les submersions marines. Au plan national, les enjeux à protéger sont considérables (en 2014, la DGPR estime à 1,4 million le nombre de résidents permanents et à 850 000 le nombre d'emplois concernés). Les opérations globales de prévention, engagées depuis 2002 au travers des programmes d'action de protection contre les inondations (PAPI) s'accompagnent désormais d'un changement de gouvernance : la loi du 27 janvier 2014 de modernisation de l'action publique crée une compétence ciblée et obligatoire relative à la gestion des milieux aquatiques et de prévention des inondations (Gemapi), et l'attribue aux communes et à leurs groupements.

En plus de ces littoraux sur lesquels sont engagées des opérations de grande ampleur, existent également des sites sur lesquels sont menées des interventions plus ponctuelles, une intervention plus globale n'étant pas pertinente pour les raisons suivantes :

- le littoral plus découpé conduit à des stratégies définies plus localement et des interventions réalisées sur des périmètres plus restreints. Cette situation se rencontre fréquemment sur le littoral de Provence-Alpes-Côte d'Azur ou encore sur le littoral breton ;
- une artificialisation plus limitée du littoral et/ou des enjeux plus disséminés conduisent également à écarter des opérations de grande envergure (Corse, littoral aquitain ou littoral normand picard, à l'exception de quelques niches : bassin d'Arcachon, baie de Somme et baie d'Authie).

L'étude s'intéresse à l'ensemble des interventions de protection contre les aléas littoraux, que celles-ci fassent partie d'un vaste programme d'actions ou qu'elles s'inscrivent dans un cadre plus restreint.

¹ Nous excluons du périmètre de l'étude les falaises, sur lesquelles les quelques rares interventions recensées s'apparentent davantage à celles engagées sur les parois rocheuses en montagne.

OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Cette étude vise à apporter une assistance dans l'estimation des coûts des aménagements de protection contre les aléas littoraux.

Les chiffres présentés éclairent sur les coûts initiaux des aménagements ainsi que sur les coûts d'entretien et de gestion. Sur les durées de vie très longues des ouvrages, les coûts d'entretien et de gestion peuvent souvent être considérés comme équivalents, voire supérieurs aux coûts initiaux.

Dans tous les cas, les coûts présentés correspondent aux dépenses effectuées avec les ressources financières mobilisables. Il ne s'agit donc pas des dépenses qu'il faudrait idéalement mobiliser. Les coûts varient en fonction de la composition et de l'état des ouvrages et des objectifs de protection, tant en investissement pour leur amélioration, qu'en entretien et gestion pour garantir le maintien de leurs performances.

Les estimations sont données pour chaque type d'intervention de façon globale (coût total de l'intervention) et de façon partielle (coûts des techniques et matériaux employés). L'utilisation des chiffres de cette étude implique de disposer d'une première définition du projet de travaux qui prenne en compte les conditions géotechniques, hydrauliques, géomorphologiques et environnementales de sa réalisation. L'utilisation de cette étude ne prendra donc tout son sens que dans la mesure où le projet aura fait l'objet d'une réflexion globale et que la définition en phase d'étude préalable de l'intervention tiendra compte a minima des contraintes les plus fortes du site.

Dans la mesure où les échantillons de données disponibles le permettent, l'étude présente les coûts observés avec trois valeurs : basse, moyenne et haute (la valeur moyenne ne doit pas être systématiquement retenue). Dans certains cas, les fourchettes de coûts sont larges et les facteurs déterminant les variations sont étudiés. Le lecteur peut donc, sur la base de la connaissance de son opération, se situer dans ces fourchettes et réduire ainsi la marge d'incertitude.

N.B. : dans cette étude nous distinguerons formellement les termes « coût », « prix » et « dépense ». Nous considérerons que les coûts (valeurs recherchées) sont estimés grâce aux dépenses (dans le cadre de l'étude des budgets d'investissement ou de gestion et d'entretien) ou grâce aux montants ou aux prix des marchés (dans le cadre de l'étude des opérations particulières).

FORME DE RESTITUTION DE L'ÉTUDE

L'exposé suit la progression présentée sur l'illustration 1.

La partie 1 définit ce que recouvre l'évaluation du coût global actualisé d'un projet. Après un rappel des stratégies de gestion du littoral en réponse aux aléas littoraux (submersion marine, érosion et recul du trait de côte), une séquence de calcul est proposée au lecteur en indiquant à chaque étape, en fonction du type d'aménagement concerné, les sections où se situe l'information utile à l'évaluation envisagée.

La partie 2 apporte les informations essentielles destinées à ancrer dans la réalité du terrain les coûts qui seront présentés par la suite : description des types d'aménagements, des effets attendus et des évolutions liées aux interventions humaines et aux actions naturelles. L'impact du changement climatique sur ces aménagements est décrit en considérant notamment la montée du niveau des mers.

La partie 3 présente la méthodologie d'étude des coûts et précise la signification des chiffres présentés.

Les parties 4 et 5 présentent les coûts suivant une grille de lecture directement inspirée des stratégies nationales, à savoir que :

- la partie 4 présente les coûts globaux des opérations de gestion du trait de côte ;
- la partie 5 présente les coûts globaux des opérations de protection contre les submersions marines.

Les parties 6 à 9 présentent les coûts observés sur les différents types d'intervention :

- en partie 6, le rechargement de plage (apport de sédiments par des moyens de transport terrestres ou nautiques ou par un dispositif de *by-pass* hydraulique, ou utilisation de drains de plage favorisant le dépôt des sédiments) ;
- en partie 7, la création, la réhabilitation ou l'entretien des cordons dunaires ;
- en partie 8, la construction, le renforcement ou l'entretien des digues ;
- en partie 9, la construction, le renforcement ou l'entretien des ouvrages de génie civil (les épis, brise-lames, perrés, murs et ouvrages de soutènement).

La partie 10 présente une lecture transversale de l'ensemble des coûts observés dans les différentes rubriques (coûts linéaires globaux, coûts surfaciques, volumiques et massiques associés aux techniques).

La partie 11 précise les références bibliographiques sur lesquelles s'appuie l'étude.

Les annexes sont constituées par :

- une présentation des données enregistrées pour les besoins de l'étude et des données qui résultent des calculs ;
- les tableaux sur lesquels sont basées les analyses des parties 6 à 9.

N.B. : dans les parties 4 et 5, les coûts linéaires se rapportent au linéaire de côte protégée, tandis que dans les parties 6 à 9, les coûts linéaires se rapportent aux linéaires sur lesquels sont menées des interventions d'un type bien identifié.

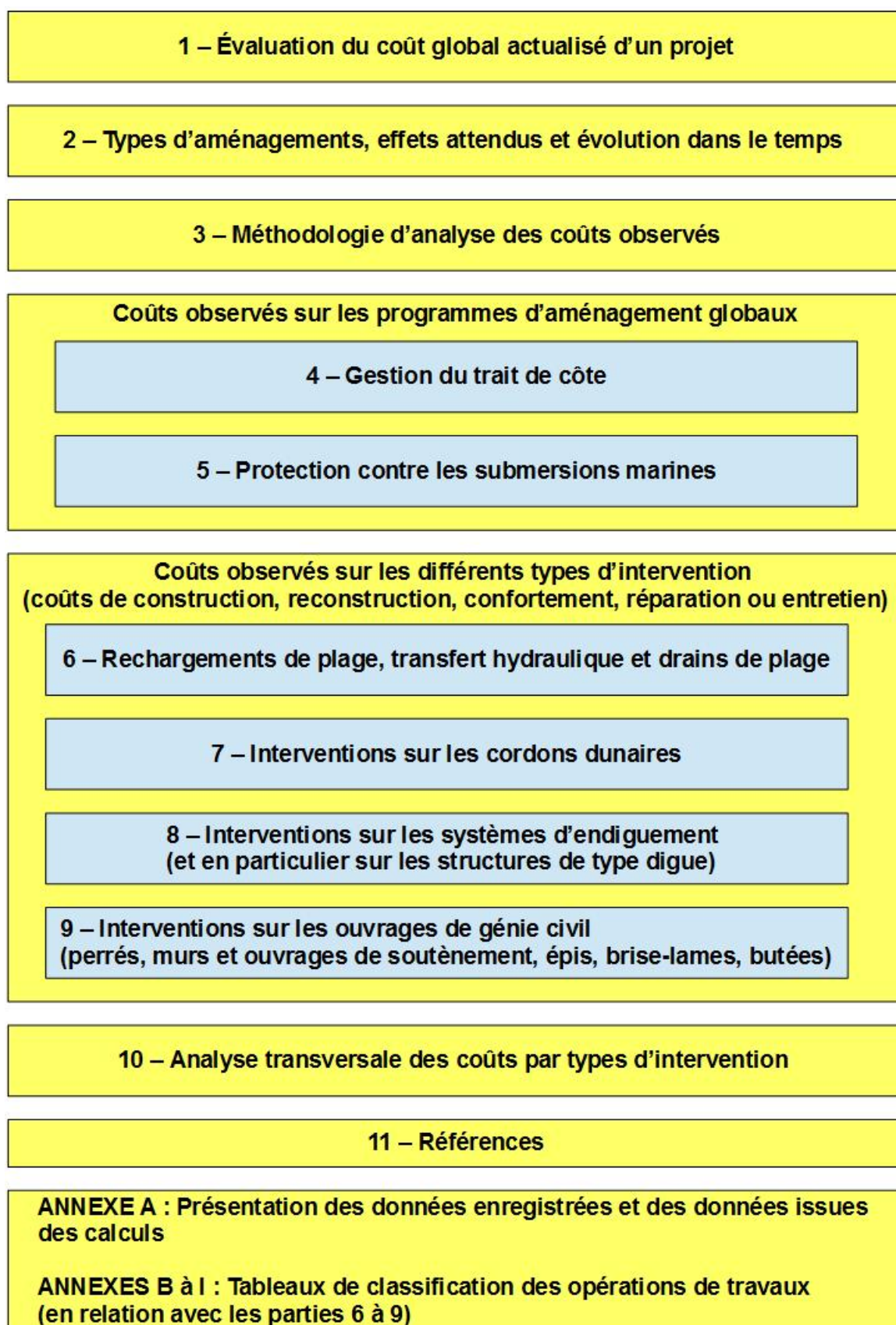


Illustration 1 : organisation du rapport

Dans les tableaux présentant les données collectées, le sigle NC est utilisé pour signifier qu'une valeur est « non connue ».

Dans les tableaux présentant les résultats d'analyse, le sigle NA est utilisé pour signifier qu'une valeur est « non applicable » à un objet.

DESTINATION DE L'ÉTUDE

Cette étude est destinée aux maîtres d'ouvrage et maîtres d'œuvre des projets de prévention des inondations ainsi qu'aux experts qui réaliseront l'évaluation de ces projets. Elle peut être utilisée dans le cadre des études préalables d'un projet et, plus spécifiquement, dans le cadre des analyses coûts-bénéfices et du volet monétaire des analyses multicritères.

Le guide est conçu pour apporter une assistance dans l'estimation des coûts aux différents stades d'élaboration du projet, en fonction des informations disponibles (connaissance du milieu et dispositions techniques adoptées). Son contenu et sa composition devraient permettre à tous les utilisateurs d'obtenir des informations sur les coûts avec une précision adaptée.

Cette étude peut également offrir aux entreprises de travaux publics un panorama des coûts observés. Enfin, elle pourra être utile à toute personne désirant acquérir des connaissances générales sur le coût des interventions sur les ouvrages de protection contre les aléas littoraux.

MODE D'ÉLABORATION DE L'ÉTUDE

L'étude a débuté par le recensement des maîtres d'ouvrage présents sur le territoire et susceptibles d'apporter des informations. Ces services ont été contactés et les informations suivantes ont été collectées :

- dépenses d'investissement, de gestion et d'entretien ;
- coûts d'interventions particulières au travers des pièces de marchés de travaux (décompte général définitif ou à défaut détail estimatif et vues en plan et en profil).

À la suite de cette première phase d'investigation, il est apparu nécessaire d'engager une enquête complémentaire pour mieux apprécier :

- les coûts des opérations directement inspirées de la stratégie nationale de gestion du trait de côte, notamment en Occitanie ;
- les coûts des systèmes d'endiguement en étudiant les travaux de protection contre les submersions marines menés sur la façade atlantique suite à la tempête Xynthia en février 2010. Nous nous sommes particulièrement intéressés au littoral de Poitou-Charentes et des Pays de la Loire ;
- les coûts des interventions sur les cordons dunaires. L'étude a porté principalement sur les activités de l'ONF sur le littoral atlantique et sur les activités de l'EID sur le littoral de la Méditerranée.

Au total, 173 opérations intéressant des ouvrages côtiers ont été analysées. Le tableau ci-dessous montre une bonne représentativité de chacun des types d'intervention.

	Nombre d'interventions
Plages	43
Cordons dunaires	14
Digues	50
Perrés	16
Murs et ouvrages soutènement	15
Épis	20
Brise-lames et butées	15
Total	173

La phase centrale de l'étude a consisté :

- à définir des groupes d'interventions homogènes qui puissent bénéficier d'un même cadre d'analyse et à définir les critères d'analyse pour chacun d'eux ;
- à enregistrer les données suivant le format d'analyse défini.

La dernière phase a consisté à rédiger le rapport en restituant sous la forme la plus simple possible les résultats chiffrés mais aussi en expliquant les variations qui apparaissent dans les coûts observés. Des parties préalables supplémentaires ont été intégrées dans le rapport afin d'éclairer le lecteur sur des points fondamentaux, qu'il s'agisse de l'« évaluation du coût global actualisé d'un projet », des « types d'aménagements, des effets attendus et de leur évolution dans le temps » ou encore de la « méthodologie d'analyse des coûts observés ». Des informations plus détaillées sur ce dernier point sont apportées en annexe A qui traite plus précisément de la « présentation des données enregistrées et des données issues des calculs ». Les tableaux d'analyse des opérations constituent les annexes suivantes.

Enfin des recherches bibliographiques ont été menées pour connaître les valeurs observées dans d'autres pays, notamment aux États-Unis et au Canada, et pour disposer ainsi de points de comparaison, tant en investissement qu'en entretien et en gestion. Il apparaît cependant que les coûts figurant dans la littérature étrangère sont difficilement comparables aux coûts observés en France du fait des fluctuations fortes et rapides des devises (par exemple entre mars 2014 et mars 2015, le taux de conversion du dollar américain contre l'euro a chuté de 1,4 à 1,1). En définitive, parmi les éléments recueillis dans la littérature étrangère, seuls ont été exploités les rapports entre coût de construction et coût d'entretien des ouvrages.

L'illustration 2 présente l'origine des données.

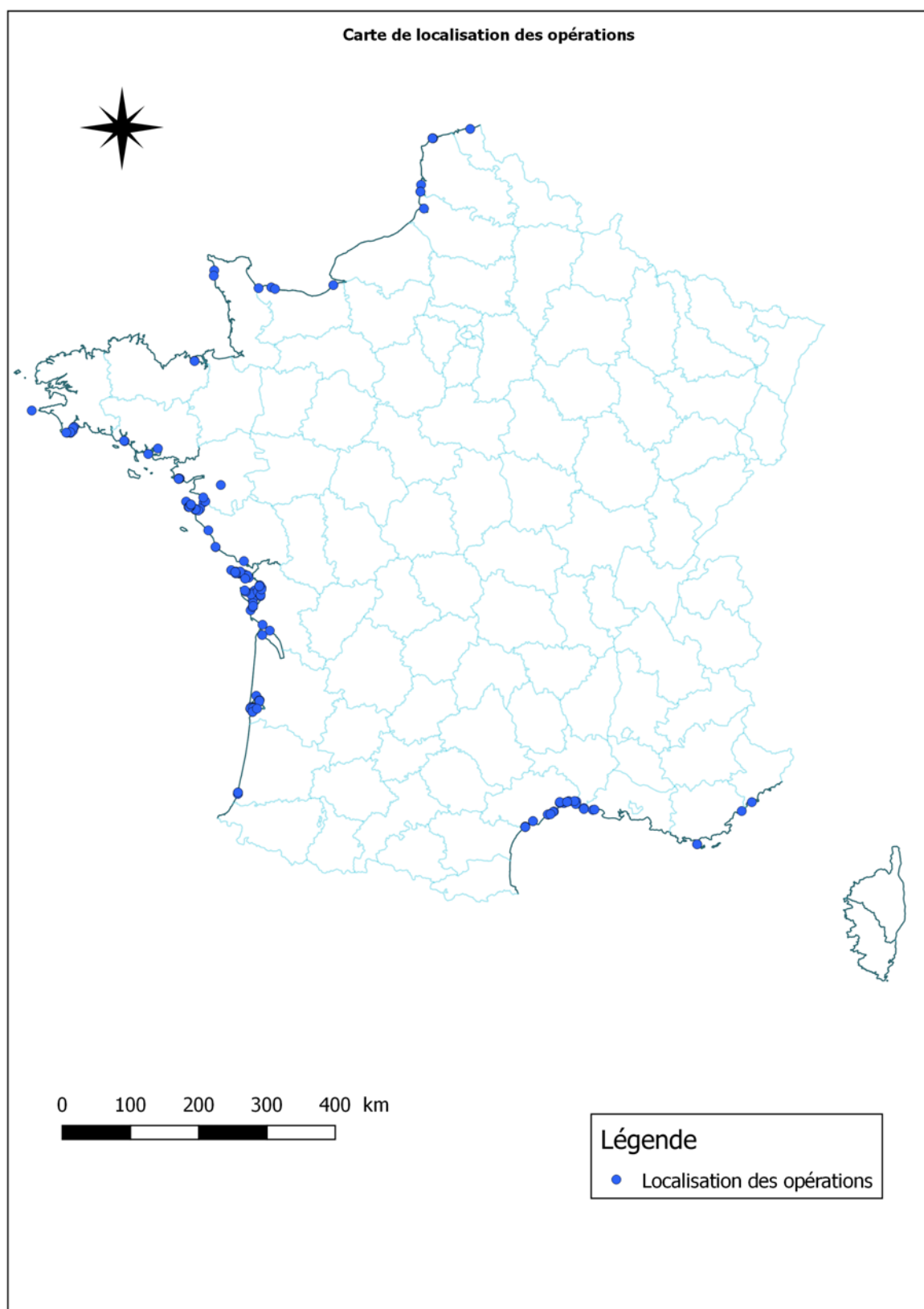


Illustration 2 : provenance des données relatives aux marchés de travaux

1. Évaluation du coût global actualisé d'un projet

Évaluer le coût d'un projet de protection contre les aléas côtiers nécessite de nombreux prérequis :

- connaître les aléas contre lesquels on souhaite se prémunir ;
- définir le périmètre du projet en fonction des enjeux à protéger ;
- définir la durée sur laquelle l'aménagement doit exercer sa fonction de protection.

Ces informations déterminent une stratégie d'intervention à adopter et il apparaît alors que, suivant l'objectif et la consistance du projet, sa temporalité est très variable :

- si un projet vise à la protection contre l'érosion, les interventions seront planifiées différemment suivant que le mode d'action retenu consiste à accompagner les processus naturels (restauration des plages et des cordons dunaires) ou à fixer le trait de côte par l'implantation d'ouvrages de génie civil ;
- si un projet vise la protection contre les submersions marines, la planification des interventions sera différente selon que le dispositif prévoit une ligne d'endiguement unique ou une ligne supplémentaire en retrait délimitant avec la première un espace tampon.

Les dépenses associées à la protection contre les aléas littoraux suivent donc un rythme tributaire tant des objectifs que des stratégies retenues. Pour apporter des éléments de réponse à ces contextes très divers, nous présenterons successivement :

- les stratégies de gestion des aléas littoraux ;
- les principes généraux de calcul du coût global actualisé d'un projet ;
- la séquence de calcul du coût global actualisé d'un projet ;
- les informations délivrées par le présent rapport sur les coûts (établissement de liens avec les parties 4 à 9 qui présentent les coûts observés en investissement, en gestion et en entretien) ;
- d'autres informations générales sur les durées de vie, les coûts et les fréquences d'entretien des structures.

1.1 STRATÉGIES DE GESTION DES ALÉAS LITTORAUX

1.1.1 Aléas littoraux

Deux grands types d'aléas sont au centre de nos préoccupations :

- l'érosion. Elle concerne tout type de côte, de la plage à la falaise. La zone à risque est constituée par une bande longeant le front de mer, mais les phénomènes en jeu sont à une échelle plus large. L'évolution du trait de côte dépend en effet du transit sédimentaire, qui se traduit par des transports de sédiments le long des plages ou vers le large. Les agents de forçage sont la houle, le vent et les courants. Pour de plus amples informations, le *Guide de gestion du trait de côte* [MEEDDM, 2010] éclaire sur les formes, processus et dynamiques des milieux littoraux ;

- la submersion marine. La zone exposée à ce risque est constituée de zones topographiques basses qui peuvent s'étendre loin en arrière du front de mer. La submersion marine intervient à l'occasion d'événements tempétueux (éventuellement en conjonction avec d'autres phénomènes, notamment sur les sites estuariens). La réflexion doit porter à l'échelle du système de protection contre les submersions marines et envisager le cas échéant plusieurs aléas de référence (combinaisons de niveaux d'eau et d'états de mer). L'étude des *Systèmes de protection contre les submersions marines* [Cerema, 2016] et le guide méthodologique *Plan de prévention des risques littoraux* [DGPR/Cerema, 2014] apportent les éléments de connaissance nécessaires à la conduite de ces analyses.

La mobilité dunaire (phénomène d'ensablement de l'arrière-pays) constitue un troisième type d'aléa, mais il est nettement moins présent sur le littoral français. Cette problématique ne sera évoquée qu'au travers des dispositifs d'entretien des cordons dunaires.

1.1.2 Stratégies d'intervention : principes généraux

Les stratégies d'intervention dépendent tout d'abord du type d'aléa contre lequel on souhaite se prémunir. Nous présentons dans cette section les lignes directrices de ces stratégies selon que le site est soumis à des phénomènes d'érosion ou à des phénomènes de submersion marine, mais dans bien des cas, les deux aléas se manifestent conjointement, ce qui nécessite de conjuguer les stratégies associées.

1.1.2.1 Les stratégies de protection contre l'érosion et le recul du trait de côte

S'agissant de la protection contre l'érosion, on peut distinguer deux types de stratégie :

- fixer le trait de côte en conservant, en adaptant ou en implantant des ouvrages de types brise-lames, épis, perrés et digues de front de mer. Cette stratégie entraîne une modification du transit sédimentaire. Ces ouvrages peuvent éviter localement un recul du trait de côte mais conduire à d'autres effets indésirables :
 - les perrés et les digues frontales entraînent un démaigrissement de l'estran par réflexion des vagues sur leur parement ;
 - les épis interceptent les sédiments. S'il en résulte une accrétion sur le site d'implantation, les zones situées en aval de la dérive souffrent d'un déficit de sédiments et s'érodent ;
- accompagner (ou restaurer) le fonctionnement naturel du littoral. Sur un littoral naturel, il s'agit de suivre l'évolution en limitant les interventions. Sur un littoral artificialisé, il s'agit de rétablir le transit sédimentaire ou de l'alimenter s'il manque de sédiments. Ces opérations recouvrent le démantèlement d'ouvrages, le reprofilage et le rechargement de l'estran, la restauration de cordons dunaires (ou de galets) et les techniques de *by-pass*.

Dans une perspective de développement durable, la seconde stratégie est privilégiée pour stabiliser l'évolution naturelle du littoral tout en lui redonnant son attrait. Dans une perspective de protection de zones à forts enjeux implantées à proximité immédiate du front de mer, la première stratégie peut s'imposer malgré ses inconvénients. Il faut alors rechercher les techniques les plus adaptables (réversibilité, prise en compte du changement climatique...) et celles dont la mise en œuvre impacte le moins l'environnement.

1.1.2.2 Les stratégies de protection contre les submersions marines

S'agissant de la protection contre les submersions marines, les stratégies mettent en œuvre deux types d'approche :

- l'endiguement visant à interdire ou à limiter la pénétration de l'eau dans le système de protection ;
- la gestion de l'eau dans le système lorsque l'endiguement laisse pénétrer un flux dans des conditions qui doivent être maîtrisées autant que possible.

Ces approches sont complémentaires et doivent être coordonnées. Pour plus d'informations sur ce sujet, se référer à l'étude des Systèmes de protection contre les submersions marines [Cerema, 2016].

1.1.2.3 Rechercher une approche intégrée

Il n'existe pas de mode d'intervention unique. Suivant les configurations et les aléas, les interventions peuvent être réalisées en mer, sur l'estran, dans la zone rétro-littorale ou de façon combinée sur ces domaines. Mais dans tous les cas, les décisions d'intervention doivent être prises à une échelle géographique adaptée et dans une perspective de long terme. D'où l'intérêt de leur inscription dans les documents de planification du territoire tels que les schémas de cohérence territoriale (SCoT) et les plans locaux d'urbanisme (PLU).

Signalons enfin que la protection contre les aléas littoraux, en s'inscrivant dans un cadre plus global de gestion du trait de côte peut être menée en synergie avec d'autres activités.

En particulier, une opération ponctuelle de rechargement de plage peut être couplée avec une opération de dragage d'un port ou d'un chenal. Une étude a par exemple été commandée par le Conseil départemental de Charente-Maritime pour connaître les processus hydrodynamiques et les caractéristiques sédimentaires des côtes charentaises (érosion, accrétion, caractéristiques granulométriques). À la suite de quoi ont été planifiées des opérations de transfert de sédiments. La côte nord de l'île d'Oléron a notamment subi de nombreux dragages pour les besoins de la navigation, tout en permettant aux plages de Châtelailon, Fouras et Ronces-les-Bains de pouvoir être ré-ensablées [Pupier-Dauchez S., 2008].

Sur certains secteurs, un partenariat de plus long terme peut même être recherché entre acteurs locaux pour systématiser ces opérations couplées de dragage et rechargement de plages. Un partenariat a ainsi été noué entre le port de Bayonne et des plages d'Anglet (cf. encadré ci-après) autour de l'achat et de l'utilisation d'une drague.

Extrait du communiqué de presse du 13 février 2014 [CCI Bayonne Pays Basque, 2014]

La CCI Bayonne Pays basque a signé ce vendredi 31 janvier la commande d'une drague pour le port de Bayonne avec les chantiers espagnols Astilleros de Murueta. Cette drague à demeure représente une vraie révolution puisqu'elle permettra, pour un coût équivalent à trois campagnes annuelles de dragage, d'ouvrir l'accès toute l'année à toutes les zones portuaires et d'attirer de nouveaux trafics. L'objectif de cet outil spécifique est également de procéder au clapage de 400 000 m³ de sable par an afin de ré-engraisser les plages d'Anglet. Une convention de prestation a été signée avec la Ville d'Anglet et l'Agglomération Côte basque Adour en vue de lutter contre l'érosion naturelle.

1.2 PRINCIPE DE CALCUL DU COÛT GLOBAL ACTUALISÉ

Pour assurer la cohérence de la terminologie adoptée avec le *Guide méthodologique de l'analyse multicritère* produit par le CGDD, rappelons que les coûts sont distingués en fonction de leur temporalité :

- **coûts initiaux** : ces coûts rassemblent toutes les dépenses engagées par le maître d'ouvrage public depuis l'origine du projet, jusqu'à la conception, la réalisation et la mise en service de l'aménagement. Ils comprennent les coûts du foncier (acquisition, indemnisation, démolition, dépollution, viabilisation), les coûts d'études, les coûts d'accompagnement de la mission de maîtrise d'ouvrage (assistance à maîtrise d'ouvrage, maîtrise d'œuvre, contrôles, etc.), les coûts des travaux et les coûts d'équipement ;
- **coûts d'entretien et d'exploitation** : ces coûts rassemblent tous les coûts différés de l'opération, c'est-à-dire toutes les dépenses effectuées après la mise en service du dispositif. Ils comprennent les coûts de maintenance (entretien courant, maintenance préventive, maintenance curative, gros entretien et renouvellement des équipements), les coûts d'exploitation (fonctionnement des vannes et des clapets...), le coût des travaux liés à des modifications fonctionnelles de l'aménagement et le coût de pilotage de l'ensemble de l'exploitation.

Cette terminologie est compatible avec le vocabulaire retenu dans le présent document. Cependant le terme « exploitation » recoupant dans son acception usuelle des prestations de gestion et d'entretien courant et de maintenance préventive, les termes d'« entretien » et de « gestion » ont été préférés pour obtenir des catégories distinctes. Nous retiendrons donc plus précisément les définitions suivantes.

L'investissement englobe :

- les études globales, les études réglementaires et le développement des systèmes informatiques de gestion des données ;
- les travaux de construction, reconstruction, confortement et autres améliorations sur les ouvrages, y compris les acquisitions foncières et les investigations et les études particulières associées.

L'entretien comprend les travaux de réparation, de maintenance et les études particulières associées.

La gestion comprend les dépenses concernant les locaux et le personnel mobilisé régulièrement pour des prestations ne modifiant pas l'état des ouvrages : administration, surveillance et inspection, manœuvre des écluses, vannes...

Le lecteur est invité à se référer également à la norme ISO 15 686-5 portant sur le calcul du coût global pour comprendre tout l'intérêt de la démarche, notamment la façon dont elle peut être utilisée pour comparer des alternatives et retenir des solutions en accord avec les principes du développement durable.

Ajoutons enfin que nous nous limiterons ici au calcul du « coût global » sans rechercher le « coût global étendu » qui prend en compte d'autres éléments, notamment les bénéfices escomptés. Prendre en compte tous ces éléments reviendrait en effet à couvrir l'ensemble du champ des évaluations socio-économiques (analyse coûts-bénéfices ou analyse multicritère). Or ce sujet est traité de façon plus exhaustive dans le Guide méthodologique de l'analyse multicritère [CGDD, 2014].

Calcul du coût global actualisé :

Le calcul du coût global actualisé dans le cadre des analyses coûts-bénéfices est basé sur des coûts hors taxes (les taxes étant des transferts, et non des pertes ou des gains nets si les réflexions sont portées du point de vue de la société dans son ensemble).

Pour mener ce calcul, le contour du projet doit être bien défini en considérant en particulier les éléments associés (correspondant à une fonction autre que celle de protection contre les aléas littoraux : voirie, accès à l'estran, passages hydrauliques...) qui sont créés ou impactés par les travaux. Le calcul doit prendre en compte cet « ensemble bien identifié » tant pour le calcul des coûts initiaux que pour celui des coûts d'entretien et de gestion. Les éléments associés peuvent en effet avoir un impact significatif sur les coûts apparaissant sur le long terme.

Les estimations doivent être effectuées dans une perspective temporelle qui est propre à chacun des projets mais qui doit être définie explicitement :

- si l'on s'intéresse uniquement au maintien d'un niveau de protection, les estimations peuvent par exemple être établies sur un horizon de trente ans (en considérant qu'il s'agit de la durée de vie des ouvrages) ;
- si l'on s'interroge sur les objectifs de protection et qu'une comparaison avec la valeur des enjeux doit être établie, il peut être préférable de se baser sur une durée de cinquante ans, tout en veillant à prendre en compte les effets du changement climatique.

En théorie, le coût global d'un projet est égal à la différence entre :

- le coût global du scénario de référence hors mise en œuvre du projet. Le coût initial d'investissement est alors nul et les dépenses d'entretien et de gestion suivent leur « tendance naturelle » ;
- le coût global résultant du projet, à savoir l'addition du coût initial d'investissement pour l'intervention et des coûts d'entretien et de gestion.

Pour chacun des termes de cette différence, le coût global sur un horizon de temps de n années est le suivant :

$$C_{Global} = C_0 + \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{(1+r_i)^i} \quad \text{avec :}$$

C_0 coût initial d'investissement total hors taxes

C_i coût des dépenses d'entretien et de gestion intervenant à l'année i.

r_i est le taux d'actualisation à l'année i. France Stratégie recommande un taux d'actualisation de 2,5 % jusqu'en 2070 et de 1,5 % ensuite dans le cadre des investissements pour la gestion des risques

Notons que le calcul des dépenses cumulées d'entretien et de gestion est très sensible au taux d'actualisation. Ainsi, en considérant un coût d'entretien correspondant à 4 % du coût de construction, la durée à partir de laquelle les sommes consacrées à l'entretien équivaldront au coût de construction est la suivante :

- pour un taux d'actualisation de 2 %, 35 ans,
- pour un taux d'actualisation de 3 %, 47 ans,
- pour un taux d'actualisation de 4 %, plus de 100 ans (à 100 ans, les dépenses actualisées de gestion et d'entretien atteignent 98 % du montant de l'investissement).

1.3 SÉQUENCE DE CALCUL DU COÛT GLOBAL ACTUALISÉ

Le schéma suivant (cf. Illustration 3) illustre la séquence de calcul proposée. Cette séquence de calcul vaut pour un projet qui peut comporter plusieurs structures, certaines existantes (dans ce cas, seuls les coûts d'entretien et de gestion sont à prendre en compte), et d'autres à réaliser (dans ce cas, le coût d'investissement des travaux initiaux s'additionne aux coûts de gestion et d'entretien). Les coûts annexes (foncier, études, sondages, contrôle, sécurité...) peuvent généralement être mutualisés au niveau du projet.

Pour l'application de ce calcul à un projet d'aménagement, il convient donc d'appliquer des conditions particulières de calcul aux différents types de structures naturelles ou anthropiques.

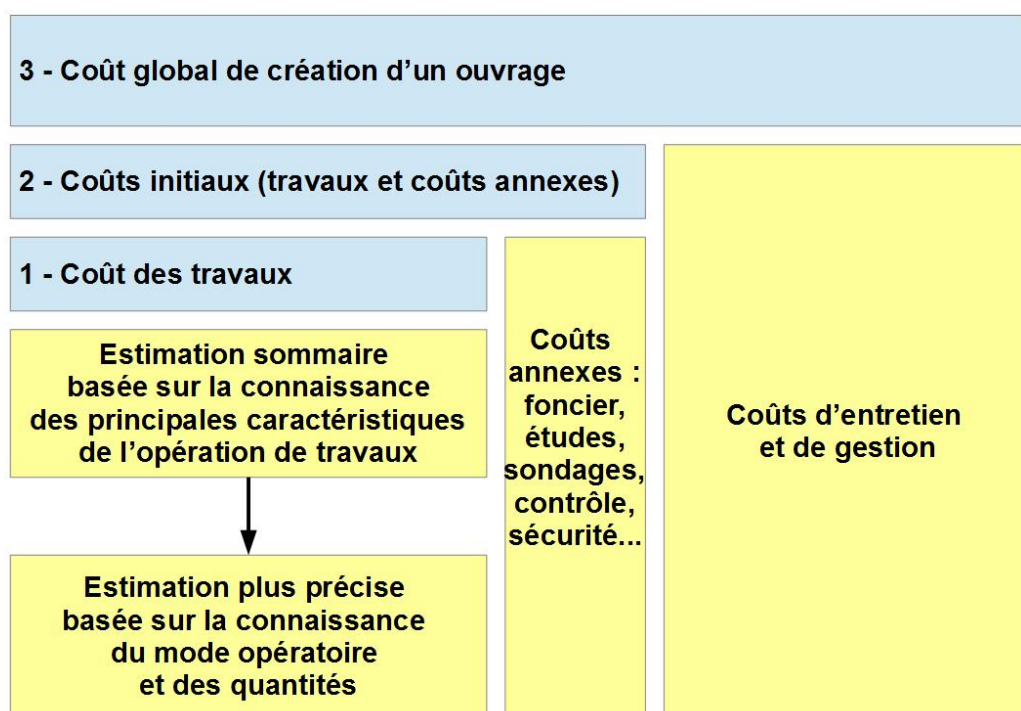


Illustration 3 : composition du coût global et mode de calcul proposé

À noter que sur l'Illustration 3 les tailles des différentes cases ne reflètent pas l'importance relative des dépenses : les durées de vie des ouvrages étant très longues, les coûts d'entretien et de gestion dépasseront en général le coût d'investissement initial.

Le calcul du coût global suit globalement la séquence suivante :

- 1 - Calcul du coût correspondant au(x) marché(s) de travaux initiaux, y compris mesures d'accompagnement et mesures compensatoires.**
- 2 - Calcul des coûts annexes initiaux (prestations d'études et de suivi des travaux, acquisitions foncières, interventions sur réseaux spéciaux).**

3 - Calcul des coûts d'entretien et de gestion.

La séquence de calcul est détaillée ci-après. Suivant l'avancement et la complexité du projet, le calcul des coûts initiaux (points 1 et 2) peut être basé sur des données différentes :

- pour des dispositifs de protection complexes (plusieurs lignes de protection, mesures compensatoires, insertion dans le milieu urbain), au stade des études préliminaires, il peut être préférable d'établir les estimations sur la base des coûts linéaires observés sur les opérations d'aménagement globales en se référant aux « coûts linéaires au kilomètre de littoral » présentés en parties 4 et 5 ;
- pour des dispositifs de protection dont le principe est simple ou pour un niveau d'avancement du projet suffisant, les estimations peuvent être établies sur la base de coûts linéaires d'interventions sur les ouvrages en se référant aux « coûts linéaires par mètre d'ouvrage » présentés en parties 6 à 9.

1 - Calcul du coût correspondant au(x) marché(s) de travaux (hors coûts annexes)

Le coût correspondant au(x) marché(s) de travaux est réputé dans cette étude couvrir **l'ensemble des prestations qui peuvent être réalisées par les entreprises de travaux publics**. Les travaux éventuels sur réseaux spéciaux (par exemple sur les câbles ou les canalisations) faisant intervenir des prestataires spécialisés, ne sont généralement pas intégrés dans le montant des marchés de travaux. Ces prestations seront évoquées au point suivant.

Le coût associé aux marchés de travaux peut donc être exprimé comme suit :

$$C_{\text{Travaux}} = C_{\text{travaux sur ouvrage}} + C_{\text{travaux additionnels}}$$

Les éléments d'information relatifs aux coûts des travaux – exprimés notamment sous forme de « coûts linéaires par mètre d'ouvrage » – sont situés en parties 6 à 9. Il s'agit des chiffres clés accompagnés de commentaires sur les facteurs déterminants destinés à mieux situer la valeur recherchée dans la fourchette annoncée. Les coûts linéaires affichés dans ces parties rendent compte des contraintes opérationnelles (déploiement et gestion du chantier) et des mesures d'accompagnement (contraintes induites par les autres usages) directement liées au projet.

Dans la plupart des cas, les coûts présentés en parties 6 à 9 correspondent donc aux deux termes de l'addition mais pour des opérations particulières telles que la création d'ouvrages en milieu urbain, certains travaux additionnels, tels que des travaux de voirie ou des mesures de ressuyage, peuvent faire l'objet de marchés distincts, sous une maîtrise d'ouvrage unique ou plurielle. Pour répondre à ces cas plus complexes, il peut être nécessaire de calculer le coût des travaux sur la base de « coûts linéaires au kilomètre de littoral ». Dans ce cas, le lecteur est invité à se référer aux parties 4 et 5 qui traitent respectivement du coût des opérations globales de gestion du trait de côte ou de protection contre les submersions marines.

2 - Prise en compte des coûts annexes

S'ajoutent au montant des travaux les coûts annexes qui peuvent être classés en deux catégories :

- les prestations d'étude et de suivi des travaux : investigations préalables, maîtrise d'œuvre en conception et réalisation, sécurité et protection de la santé... ;
- les acquisitions foncières et d'autres interventions spéciales, notamment sur les réseaux (câble de communication, câble électrique, conduite de gaz, canalisation de rejet en mer).

Le coût initial total hors taxes s'exprime donc de la façon suivante :

$$C_0 = K \times C_{\text{Travaux}} + C_{\text{foncier}} + C_{\text{réseaux spéciaux}}$$

avec :

- C_{Travaux} représentant le coût des travaux inclus généralement dans les marchés de travaux.

-K coefficient multiplicateur permettant de prendre en compte les prestations d'étude et de suivi des travaux. Les valeurs suivantes peuvent être adoptées pour ce coefficient (valeurs obtenues dans le volet fluvial de l'étude) :

- par défaut 1,1
- dans le cas de grands projets sans difficulté particulière la valeur peut être réduite à 1,05
- dans le cas des opérations dans un environnement complexe, la valeur peut être portée à 1,15

- C_{foncier} représentant les dépenses liées aux acquisitions foncières

- $C_{\text{réseaux spéciaux}}$ représentant les interventions sur les réseaux qui nécessitent l'intervention directe de leurs gestionnaires.

L'estimation des coûts supplémentaires liés aux prestations intellectuelles, aux acquisitions foncières et aux réseaux spéciaux varie fortement en fonction du contexte. Des indications sur les plages de variations figurent en section 4.4 pour les opérations de gestion du trait de côte et en section 8.4 pour les opérations relatives aux systèmes d'endiguement.

3 - Addition des coûts d'entretien et de gestion

S'ajoutent au coût total initial C_0 les coûts d'entretien et de gestion, qui peuvent représenter des coûts équivalents voire supérieurs aux coûts initiaux. Le périmètre d'évaluation du coût d'entretien et de gestion doit être cohérent avec le contour du projet défini initialement. Il doit notamment prendre en compte les éléments associés (par exemple un ouvrage hydraulique ou un accès permanent ou temporaire) qui sont créés ou impactés par les travaux pour la détermination du coût initial. Des indications plus précises sont apportées ci-après sur les sections du rapport consacrées à l'évaluation des coûts d'entretien et de gestion.

1.4 INFORMATIONS DÉLIVRÉES PAR LE PRÉSENT RAPPORT SUR LES COÛTS

La séquence de calcul précédemment exposée traite du coût global actualisé d'un projet destiné à améliorer la protection contre les aléas littoraux. Les deux éléments de contexte suivants rallongent en général les calculs :

- les projets concernent souvent plusieurs types d'aménagement ou de structure ;
- les projets s'inscrivent généralement sur des territoires qui comprennent déjà certains dispositifs de protection.

Dans ces conditions, il est nécessaire de prendre en compte dans le calcul :

- le coût de réalisation, d'entretien et de gestion pour les aménagements projetés ;
- les coûts d'entretien et de gestion pour les aménagements existants.

Ces coûts dépendant du type d'aménagement (ou plus précisément du type de structure), le tableau ci-après pointe les sections du présent rapport qui sont dédiées à chacun d'eux (ou à chacune d'elles), tant en investissement, qu'en entretien et en gestion. Les coûts détaillés des techniques présentés en complément peuvent servir à l'estimation des opérations particulières d'investissement ou d'entretien.

Objet	Type d'intervention	Coût d'investissement	Coût de gestion et d'entretien	Coût détaillé des techniques
Frange littorale (partie 4)	Gestion du trait de côte avec volet terrestre	4.2	(*) et (**)	
	Gestion du trait de côte sans volet terrestre	4.3	(*) et (**)	
Système de protection (partie 5)	Amélioration de la protection contre les submersions marines	5.4	(*)	
Plage (partie 6)	Rechargements (***)	6.1	6.1	6.1
	Interventions sur les systèmes de <i>by-pass</i> (section 6.2)	6.2.1	6.2.2	
	Interventions sur les drains de plage (section 6.3)	6.3.1	6.3.2	
Cordons dunaires (partie 7)	Interventions sur les cordons dunaires	7.2	7.1	7.3
Digues (partie 8)	Interventions sur les digues avec parement	8.2.1 et 8.2.2	8.2.3 et 8.5	8.2
	Interventions sur les digues sans parement	8.3.1 et 8.3.2	8.3.3 et 8.5	8.3
Ouvrages de génie civil (partie 9)	Interventions sur les perrés (section 9.1)	9.1.1 et 9.1.2	9.1.3 et 9.6	9.1
	Interventions sur les murs et ouvrages de soutènement (section 9.2)	9.2.1 et 9.2.2	9.2.3 et 9.6	9.2
	Interventions sur les épis (section 9.3)	9.3.1	9.3.2 et 9.6	9.3
	Interventions sur les brise-lames (section 9.4)	9.4.1 et 9.4.2	9.4.3 et 9.6	9.4
	Interventions sur les butées de pied (section 9.5)	9.5		9.5

* Pour les opérations globales, les coûts d'investissement observés sont retranscrits en partie 4 pour ce qui concerne la gestion du trait de côte et en partie 5 pour ce qui concerne la protection contre les submersions marines. Ces coûts sont utilisables en étude préliminaire pour obtenir un ordre de grandeur du coût initial de ce type d'opération. Néanmoins pour une estimation plus précise, tant en investissement qu'en entretien et en gestion, il convient de consulter les parties 6 à 9 qui apportent des estimations détaillées pour les interventions sur les différents types de structure.

** Un exemple d'évaluation du coût prévisionnel de la protection contre les aléas littoraux à grande échelle a été réalisé par le Cerema Méditerranée sur la région Occitanie [Cete Méditerranée, 2011]. La définition des orientations du projet repose sur la comparaison de plusieurs scénarios d'aménagement. Cette étude, dont un résumé est présenté en section 4.1, peut utilement être consultée en complément du présent guide.

*** Selon la stratégie de gestion et selon la nature du rechargement, cette opération peut être considérée soit comme de l'investissement (par exemple en accompagnement de l'aménagement d'une batterie d'épis ou d'un brise-lames), soit comme de l'entretien (lorsque des rechargements périodiques sont prévus pour compenser une érosion).

1.5 AUTRES INFORMATIONS GÉNÉRALES SUR LES DURÉES DE VIE, LES COÛTS ET LES FRÉQUENCES D'ENTRETIEN DES STRUCTURES

La qualité d'un projet dépend largement de la durée sur laquelle l'aménagement pourra apporter une protection performante contre les aléas littoraux. Les opérations d'entretien jouent naturellement un rôle essentiel dans le maintien de l'état des structures et dans la conservation de leurs performances. Il est donc nécessaire de prévoir des interventions qui peuvent être, soit programmées à des intervalles réguliers, soit réalisées en réponse aux épisodes de tempête. La stratégie d'entretien vise à optimiser la durée de vie des structures pour que le coût annuel sur la durée du projet soit le plus bas possible.

Contrairement au domaine fluvial où la structure des ouvrages et les conditions hydrauliques peuvent être relativement stables sur de longs linéaires (quitte à considérer séparément des segments particuliers), dans le domaine côtier, les conditions hydrauliques, la géomorphologie et la nature des ouvrages sont généralement variables. Les événements tempétueux déterminent largement les dates et l'ampleur des détériorations. Les conséquences de ces événements sont elles-mêmes très variables suivant les états de mer générés (provenance, hauteur significative et période des vagues) et la concomitance de l'événement avec le pic de marée. Cette situation impose d'effectuer les calculs des coûts de maintenance sur la base de valeurs correspondant aux « bonnes pratiques », tant pour la périodicité des opérations d'entretien que pour le montant alloué à ces opérations.

En réponse à ce contexte instable, deux modes d'évaluation ont été envisagés pour calculer les dépenses annuelles linéaires de gestion et d'entretien (ces modes d'évaluation sont précisés en section 8.5 pour les digues et en section 9.6 pour les ouvrages de génie civil) :

- calcul sur la base des dépenses observées sur les budgets de gestion et d'entretien des parcs ;
- calcul d'un pourcentage du coût d'investissement.

La seconde approche se justifie par le fait que le coût de construction d'un ouvrage intègre des paramètres tels que ses « dimensions principales » et les « techniques de mise en œuvre des matériaux ». On suppose donc que ces paramètres, qui ont déterminé le coût de construction (ou d'une reconstruction ou d'une réfection majeure), influenceront aussi sur les coûts moyens d'entretien. Précisons que si les « dimensions principales » peuvent être considérées avoir une influence similaire pour tous les ouvrages, les « techniques de mise en œuvre des matériaux » en phase d'entretien peuvent être selon les cas :

- assimilables à celles employées lors de la construction (ou d'une reconstruction ou d'une réfection majeure) : rehaussement d'une digue, rechargement d'enrochements sur une carapace, remplacement de palplanches... ;
- ou sensiblement différentes : ragréage de maçonnerie, injection de fissures...

Le ratio « coût annuel de gestion et d'entretien / coût de construction » doit donc tenir compte des comportements connus « au quotidien » et « en réaction à des événements tempétueux » et des techniques existantes pour réparer ou conforter l'ouvrage considéré.

Le tableau ci-après apporte des indications sur la durée de vie des structures et sur les fréquences moyennes d'entretien couramment adoptées, sans que l'on puisse considérer néanmoins que ces fréquences doivent s'appliquer uniformément dans tous les contextes.

Ces informations ont été recueillies par une étude bibliographique et confrontées aux valeurs constatées sur des parcs d'ouvrages du littoral français (ces indications ne sont apportées que pour les digues et les ouvrages de génie civil. Sur les plages et les cordons dunaires, se référer aux parties 6 et 7).

Type de structure	Durée de vie (ou intervalle entre 2 réfections majeures)	Fréquence d'entretien (*)	Source
Digues en terre végétalisées (ouvrages qui ne sont normalement pas exposés aux vagues)	100 ans	Annuelle	[Cerema, 2014]
Ouvrages en béton (**) ou en enrochements	50 à 100 ans	Tous les 15 ans	[Egis, ULCO, 2014], [Cete Méditerranée, 2011], [Heberger et al., 2009], [Tecsult, 2008]
Ouvrages en palplanches	50 ans sans protection cathodique 100 ans avec protection cathodique	20 ans (remplacement des anodes sacrificielles)	Port de Calais
Ouvrage en maçonnerie	100 ans	5 à 10 ans	[Heberger et al., 2009], [Cerema, 2014]
Épis en bois	jusqu'à 100 ans	Tous les 15 ans	DDTM62, Commune de Noirmoutier
Ouvrages en géotextile immergés ou protégés par du sable	40 ans	Annuelle (Réparation des déchirures accidentelles ou remplacement des éléments trop détériorés)	[Egis, ULCO, 2014], [Cete Méditerranée, 2011]
Ouvrages en géotextile exposés aux agents météo-marins	15 ans	Annuelle (Réparation des déchirures accidentelles ou remplacement des éléments trop détériorés)	[Egis, ULCO, 2014], [Cete Méditerranée, 2011]

* La fréquence d'entretien peut être réduite dans le cas d'ouvrages (épis, perrés...) positionnés sur des sites régulièrement rechargés en sable. Cette disposition permet notamment de contrôler les « effets de bout » qui accélèrent la perte de sable aux extrémités des ouvrages. A contrario, le changement climatique et la surélévation du niveau moyen des mers conduiront à une plus forte exposition des ouvrages et donc à une augmentation nécessaire de la fréquence d'entretien.

** Pour le béton non armé, les formes en blocs seront moins vulnérables que les formes en plaques. La réponse de la structure au cours d'une tempête dépend quasi exclusivement de la conception. Peu d'évolutions sont attendues en temps normal sauf pathologies propres au béton (alcali-réaction...). Par contre pour le béton armé, l'évolution en temps normal est liée à la corrosion des armatures en plus des pathologies propres au béton.

2. Types d'aménagements, effets attendus et évolution dans le temps

Qu'il s'agisse d'opérations de grande envergure combinant plusieurs mesures, ou d'opérations plus modestes, l'estimation de leur coût passe nécessairement et en premier lieu par la connaissance des principaux types de formations naturelles ou d'ouvrages. Cette partie présente successivement et succinctement en suivant la typologie annoncée :

- les formations naturelles ou partiellement anthropisées sur lesquelles la plupart des actions de « gestion du trait de côte » sont menées : les plages et les cordons dunaires (ou de galets) ;
- les structures constituant les systèmes d'endiguement (principalement les digues) ayant une vocation spécifique de protection contre les submersions marines ;
- les ouvrages particuliers de génie civil : les épis, brise-lames, perrés, murs et ouvrages de soutènement, dans leur conception traditionnelle (enrochements, béton, maçonnerie) ou dans des conceptions plus récentes de géotextiles remplis de sable. Ces ouvrages accompagnent, sur des linéaires en général limités, les formations naturelles et les systèmes d'endiguement.

Dans chacun des cas, la présente partie traite des formes, compositions, fonctions, durées de vie théoriques (durée pendant laquelle la fonction est assurée) et des effets du changement climatique.

Les aménagements ne sont abordés que par rapport à leur fonction de protection contre les aléas côtiers. Néanmoins il convient de garder à l'esprit que d'autres fonctions existent : circulation, promenade, haut de cale, fonctions d'amarrage et d'accostage, support de canalisations, de barrages, de vannes, d'exutoires... Ces fonctions peuvent accroître les coûts d'investissement, de gestion et d'entretien.

2.1 FORMATIONS NATURELLES OU PARTIELLEMENT ANTHROPISES (PLAGES ET CORDONS DUNAIRES)

Les formes littorales sont classiquement subdivisées en deux ensembles :

- les côtes d'accumulation (plages, dunes, embouchures fluviales...) qui subissent alternativement des phases d'engraissement et de démaigrissement ;
- les côtes d'ablation telles que les falaises rocheuses qui ne subissent que des processus d'érosion.

Les matériaux sont de types très variables, de même que les formes. Néanmoins une distinction fondamentale existe : les côtes d'accumulation sont constituées principalement de sédiments meubles provenant de la sédimentation marine ou de l'activité biologique (galets, sable, vase...), tandis que les côtes d'ablation sont des côtes rocheuses, si l'on excepte le produit de l'érosion situé à leur pied (cf. Illustration 4). Les capacités d'intervention sur les côtes d'ablation étant extrêmement réduites, nous ne développerons pas ce point.



Illustration 4 : côte d'accumulation, Port-des-Barques (1). Côte rocheuse, Angoulins (2)
(auteur : SDIS17 et S. Dupray, Cetmef)

Dans tous les cas, les formes littorales évoluent sous les actions d'origines marine (niveau d'eau, vague, courant), continentale (écoulement des fleuves ou simple ruissellement), atmosphérique (vent, température, eau sous toutes ses formes) et anthropique (implantation d'ouvrages, piétinement...). Le littoral doit donc être considéré comme un système hydrosédimentaire, système complexe d'interactions à diverses échelles de temps et d'espace. En général, sur les côtes d'accumulation, la constitution des stocks sédimentaires s'effectue sur des périodes longues (les « temps morts ») tandis que le déstockage intervient sur des périodes courtes (les « temps forts »). Le suivi des dynamiques littorales se doit donc d'être régulier dans le temps et dans l'espace, car les évolutions sont non linéaires. Pour savoir si les évolutions observées lors d'une tempête s'inscrivent dans l'équilibre dynamique du site ou s'il s'agit d'une rupture de cet équilibre, il convient de s'interroger sur la représentativité temporelle des observations réalisées.

Il doit être noté enfin que les dunes, qui constituent les éléments les plus remarquables en termes de protection contre les submersions marines, sont principalement constituées sous l'action du vent ; une action atmosphérique qui ne doit donc pas être négligée par rapport à celle de la mer.

Dans la présente section, nous décrivons les principes généraux d'intervention sur ces formations naturelles (qui peuvent être qualifiées plus exactement de « partiellement anthropisées »). Le détail de ces techniques sera présenté en partie 6 lorsqu'elles intéressent l'estran et en partie 7 lorsqu'elles intéressent le cordon dunaire. Nous prolongerons l'exposé par une réflexion sur les possibilités d'adaptation au changement climatique de ces formations naturelles.

2.1.1 Principes généraux d'intervention

Trois types d'intervention peuvent être envisagés :

- l'apport de sable par des moyens mécaniques (rechargement artificiel de sable sur plage ou sur cordon dunaire) ;
- la stabilisation du sable par un procédé de drainage (Écoplage®) ;
- le stockage du sable transporté par le vent (ganivelles, brise-vent ou branchages).

Il s'agit toujours de maintenir ou d'accroître le stock sédimentaire, en maîtrisant sa forme.

2.1.1.1 Apport de sable par des moyens mécaniques

L'alimentation sédimentaire artificielle est utilisée pour compenser une dynamique naturelle qui conduit à l'érosion. L'objectif d'une opération de rechargement est donc de compenser les apports déficitaires du transit sédimentaire. La granulométrie doit être suffisante pour offrir une résistance correcte à l'action des vagues et des courants. Par ailleurs, dans le cas où la plage serait bordée en partie haute par un ouvrage réfléchissant (forte inclinaison et faible porosité), le volume de sable déposé doit être suffisant pour empêcher la réflexion des houles sur cet ouvrage.

De multiples moyens mécaniques peuvent être mobilisés pour procéder à un rechargement de plage ou à un confortement dunaire :

- des moyens uniquement terrestres peuvent être utilisés lorsque le sable est acheminé par la route ou lorsqu'il s'agit simplement de remodeler l'estran. Lorsqu'un chenal sépare le site de prélèvement du site de dépôt (cas de Capbreton), un système de canalisation (bypass) peut permettre d'assurer le déplacement du sable sans faire appel à des moyens classiques de transport terrestre ;
- des moyens nautiques sont très souvent requis en complément des engins assurant la répartition du sable à terre. En effet, le sable provient généralement soit d'opérations de dragage portuaire, soit de gisements au large. Les deux principaux types d'engins nautiques sont la drague stationnaire (utilisée pour des petits chantiers) et la drague aspiratrice en marche (utilisée pour les opérations de rechargement massif). L'illustration 5 présente les phases de dragage et de refoulement.

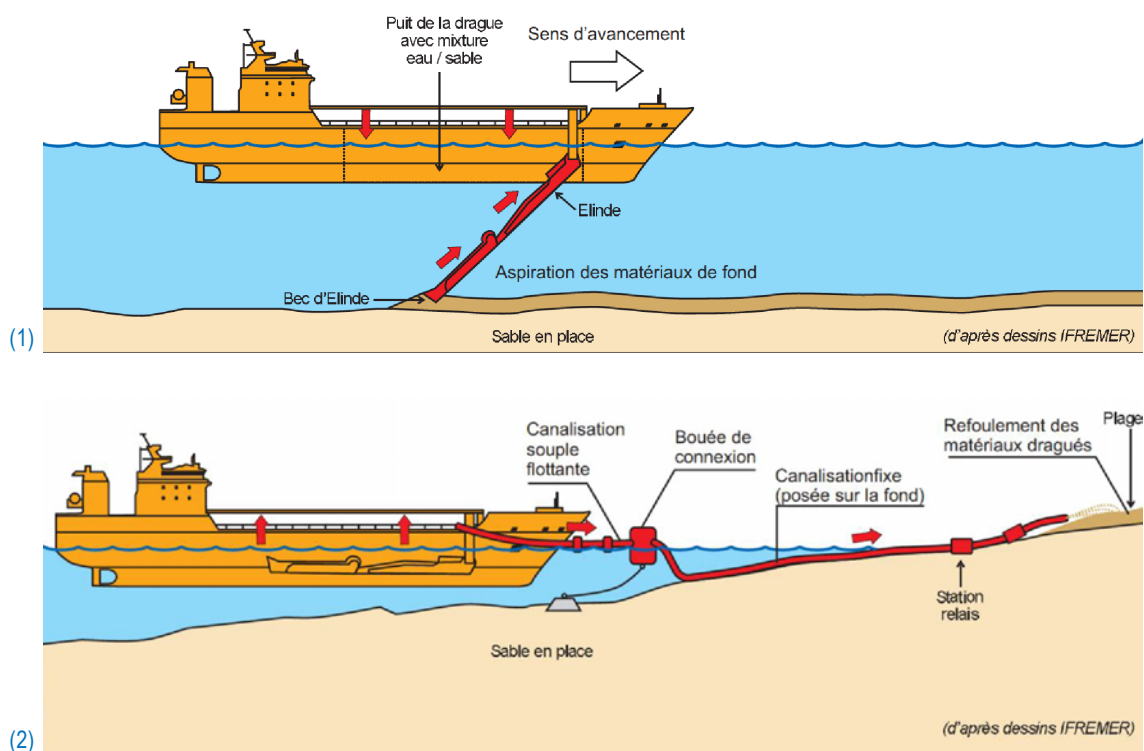


Illustration 5 : opération de dragage (1) et de refoulement (2) par une drague aspiratrice en marche
(source : [Artelia, 2013] et Ifremer)

2.1.1.2 Drainage de la plage

Le principe physique du rabattement de la nappe phréatique est principalement exploité par le procédé Écoplage®. Le dispositif se compose d'un système de tuyaux enterrés à deux mètres sous le sable, qui draine l'eau de la plage et la renvoie en mer (cf. Illustration 6). L'eau s'écoule par gravité dans les drains puis vers une station de pompage.

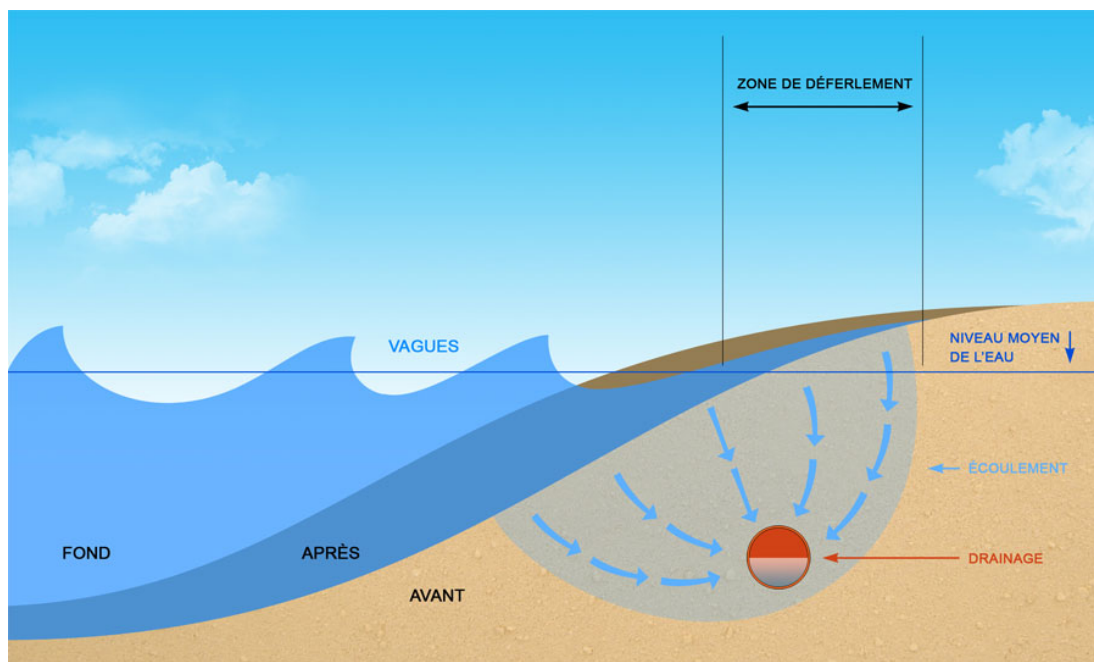


Illustration 6 : principe du drainage de plage
(source : Écoplage®)

Sous l'effet du dispositif, les matériaux sableux présents sur la plage se désaturent plus rapidement. Les grains tendent à se resserrer, en modifiant ainsi le squelette du sol. Cette modification conjuguée à la baisse de la saturation freine la mise en mouvement des matériaux par l'assèchement des vagues incidentes et la limitation des vagues de retrait.

Ce dispositif est principalement destiné au cas des plages réflexives affectées d'une tendance à l'érosion lente, sans déplacement saisonnier de forte amplitude de la position du trait de côte. Son déploiement dans la baie d'Agay (département du Var) a fait l'objet d'un suivi détaillé [Adrien Lambert *et al.* 2007].

L'eau de mer, filtrée par le sable de la plage au travers duquel elle a transité avant d'être recueillie par le drain, peut être directement rejetée par une conduite sous-marine (dans le cas de Saint-Raphaël à 50 mètres de la côte). Mais d'autres utilisations de l'importante quantité d'eau de mer filtrée par ce dispositif peuvent être envisagées : elle peut servir pour produire de la chaleur ou du froid en association avec une pompe à chaleur, oxygéner des lagunes et des étangs de marinas, approvisionner des piscines, alimenter des centres de thalassothérapie, des bassins piscicoles et conchylicoles, ou encore des usines de dessalement d'eau de mer pour la production d'eau potable [source : <http://www.ecoplage.fr/fr/faq.html>].

2.1.1.3 Stockage du sable transporté par le vent

Les techniques de restauration et de protection des cordons dunaires consistent principalement en la mise en place de ganivelles, de brise-vent et de branchages qui piègent le sable et contribuent à réduire la fréquentation dans les dunes. La pose de ganivelles peut être accompagnée d'une revégétalisation artificielle. Lorsque le cordon dunaire est positionné en première ligne de défense, la conservation de ce système naturel repose sur les échanges entre la plage et le cordon dunaire. Les différents types d'interventions (création et réhabilitation de cordons dunaires et les opérations d'entretien) sont présentés en partie 7. L'illustration 7 montre la création d'un cordon dunaire dans le cadre d'une opération menée par l'EID Méditerranée.



Illustration 7 : création d'un cordon dunaire à Valras
(auteur : Cerema)

2.1.2 Adaptation au changement climatique

Contrairement aux autres types d'aménagements qui subiront les effets du changement climatique par des détériorations ou une perte d'efficacité avec une capacité réduite d'adaptation, les interventions sur les formations naturelles sont des mesures relativement modulables. En fonction de la surélévation du niveau des mers et des événements tempétueux, la périodicité ou l'ampleur des interventions peuvent en effet être ajustées. Ces interventions devront en général viser à restaurer périodiquement le profil de la plage ou de la dune mais dans certaines conditions, le rechargement peut aussi procurer des effets bénéfiques sur le long terme, en particulier lorsque les sédiments restent captifs au sein d'une cellule hydrosédimentaire et qu'ils peuvent être ainsi remobilisés au fil des saisons. La vitesse à

laquelle une plage rechargée s'érode dépend de l'action des vagues, de la répartition du sable (qui doit être régulière) et de la granulométrie [Usace, 1984]. Sur les cordons dunaires, les vitesses d'érosion dépendront en outre du stock de sédiments mobilisable sur l'estran ainsi que de la force et de la direction des vents.

2.2 OUVRAGES FORMANT LES SYSTÈMES D'ENDIGUEMENT

Pour les besoins du calcul, notre étude est tournée plus particulièrement sur l'ouvrage digue, il convient cependant de replacer cette structure dans le cadre plus large du système d'endiguement dont la définition réglementaire est donnée à l'article R. 562-13 du décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 :

« La protection d'une zone exposée au risque d'inondation ou de submersion marine au moyen de digues est réalisée par un système d'endiguement. Ce système comprend une ou plusieurs digues ainsi que tout ouvrage nécessaire à son efficacité et à son bon fonctionnement, notamment :

- des ouvrages, autres que des barrages, qui, eu égard à leur localisation et à leurs caractéristiques, complètent la prévention ;
- des dispositifs de régulation des écoulements hydrauliques tels que vannes et stations de pompage. »

Dans la présente section, nous nous concentrerons sur le type d'ouvrage qui génère le plus de dépenses, à savoir les digues, ce qui ne nous interdira pas, dans la présentation des coûts, d'évoquer aussi la part non négligeable que peuvent représenter les autres types d'ouvrages.

2.2.1 Formes et fonctions des digues

Les digues peuvent présenter différentes formes en relation avec les fonctions recherchées, les sollicitations hydrauliques et leur environnement. L'Illustration 8 en donne une représentation schématique.

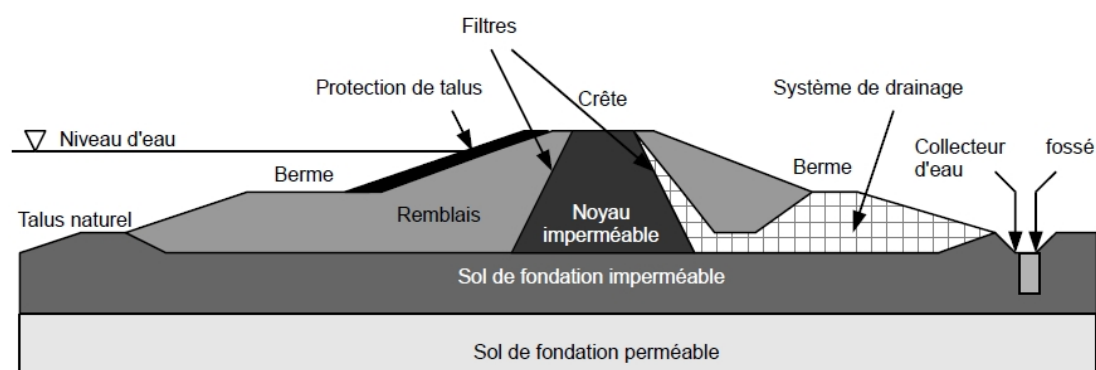


Illustration 8 : les composants d'une digue
(traduit de [Ciria, Medde, Usace, 2013])

Ces ouvrages sont disposés directement en bordure des littoraux et des cours d'eau ou en retrait, parallèlement ou perpendiculairement suivant leur rôle dans le système de protection contre les inondations. Leur fonction première en tant que structure demeure néanmoins de faire obstacle au passage de l'eau jusqu'à une certaine cote.

Il convient de signaler ici pour la bonne compréhension des termes utilisés par la suite que la digue se distingue du perré et des murs de soutènement du fait que son profil en travers présente un talus libre de part et d'autre de sa crête. Cette caractéristique essentielle conditionne son comportement mécanique et ses modes de défaillance. Une digue est notamment soumise au risque de brèche.

Le *Guide international sur les digues* [Ciria, Medde, Usace, 2013] présente de façon détaillée les formes, fonctions et mécanismes de défaillance des digues. Les principaux composants apparaissant sur la coupe-type de l'illustration 8 peuvent être décrits brièvement de la manière suivante :

- le sol, tel que représenté, est un exemple de configuration géologique constituée d'une couche imperméable superposée à une couche perméable. L'étude de la géologie du sol support est essentielle dans la conception d'une digue ;
- les matériaux constitutifs du corps de digue peuvent être de nature variable : tout-venant, argile, matériaux granulaires sélectionnés. Leur choix dépend des caractéristiques recherchées, notamment de la perméabilité ;
- les revêtements doivent être adaptés en fonction des conditions du milieu extérieur : enrochements, maçonnerie, béton ou couverture végétale. En Illustration 9, la digue présente côté mer un revêtement en béton et enrochements et côté terre une couverture végétale.



Illustration 9 : digue de Noirmoutiers
(auteur : Yann Deniaud, Cerema)

Les entrées d'eau marine par surverse en quantité limitée peuvent être acceptables, à condition que les désordres et leurs conséquences, de même que leur traitement et la remise en état des ouvrages, soient limités et gérables, notamment en matière de sécurité. Une stratégie souvent pertinente consiste donc à privilégier les travaux d'entretien et le confortement des ouvrages existants, afin d'assurer leur pérennité, plutôt que de prévoir de coûteux travaux visant à rehausser le niveau des ouvrages actuels [BRL, août 2013].

2.2.2 Adaptation au changement climatique

Une surélévation du niveau marin peut engendrer une augmentation de la fréquence de submersion et de l'érosion externe (par un accroissement des débordements et de la puissance des vagues). L'accroissement de la hauteur des digues pour tenir compte du changement climatique dépend de nombreux facteurs :

- cette surélévation ne doit pas engendrer une augmentation de la vulnérabilité dans les zones à enjeux sous l'influence des digues ;
- le coût de l'opération doit être acceptable au regard des bénéfices. En l'absence de matériaux convenables à proximité, cette condition peut n'être pas satisfaite ;
- les matériaux de fondation doivent disposer des caractéristiques mécaniques suffisantes pour supporter le poids additionnel lié à la surélévation ;
- pour assurer la stabilité de la digue, un élargissement est souvent nécessaire. Une emprise foncière doit être disponible pour réaliser cet élargissement.

Dans certains cas, la réalisation de nouveaux systèmes d'endiguement pourra être envisagée pour protéger des enjeux déjà implantés. La disponibilité des emprises foncières et les interactions avec les autres usages côtiers poseront des questions particulières (cheminement piéton sur la côte, contraintes paysagères...).

Dans d'autres cas, la construction de digues ou de murs de défense contre la mer ne sera pas justifiée au regard des enjeux à protéger.

2.3 OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

Les ouvrages de génie civil visent d'une manière générale à fixer le trait de côte ou à stocker des sédiments. Ci-après nous présentons leurs formes et principes de fonctionnement ainsi que les effets du changement climatique sur ces structures.

2.3.1 Formes et fonctions des ouvrages de génie civil

2.3.1.1 *Perrés*

Un perré est un talus naturel ou artificiel protégé des sollicitations du milieu environnant par un revêtement. Contrairement à la digue, le perré ne présente qu'un seul talus. Outre la fixation du trait de côte, la vocation d'un perré en matière de protection contre les aléas littoraux est principalement de limiter les franchissements par les vagues (voire de limiter les débordements pour des niveaux d'eau supérieurs à sa cote d'arase). Cette fonction peut être assurée en amortissant la houle sur son talus qui doit être suffisamment incliné pour éviter les phénomènes de réflexion. De plus, le perré peut disposer d'une carapace suffisamment poreuse pour dissiper l'énergie des vagues ou peut être surmonté d'un mur pare-vagues de forme adaptée.

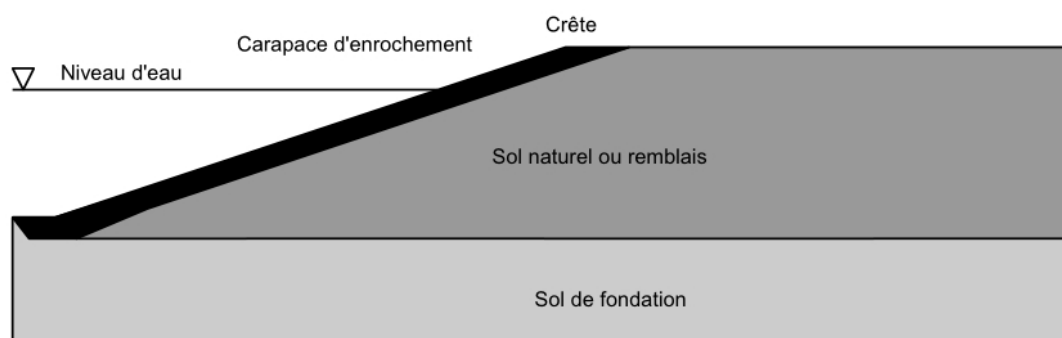


Illustration 10 : coupe-type d'un perré
(adapté de [Ciria, Medde, Usace, 2013])

Suivant le mode de construction, le perré peut donc être considéré comme le seul revêtement habillant un terrain existant ou comme un ensemble constitué du revêtement et des matériaux mis en œuvre pour supporter ce revêtement.

Le corps de l'ouvrage est constitué des matériaux présents naturellement sur le site ou de matériaux importés. Les matériaux constitutifs du revêtement et le cas échéant du corps de l'ouvrage sont similaires à ceux utilisés pour la construction d'une digue. En particulier le choix des matériaux doit être effectué de telle sorte que le talus résiste aux contraintes hydrauliques.

2.3.1.2 Murs et ouvrages de soutènement

Les murs et ouvrages de soutènement sont constitués principalement d'un parement vertical ou comportant un léger fruit (cf. Illustration 11).

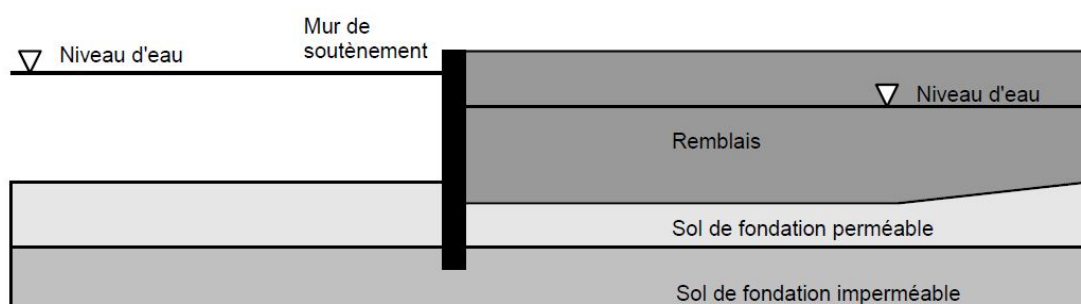


Illustration 11 : coupe-type d'un mur de soutènement
(adapté de [Ciria, Medde, Usace, 2013])

La structure qui assure le soutènement peut être en béton, en palplanches ou en maçonnerie et fonctionner suivant différents modes :

- mur poids pour des éléments en béton ou en maçonnerie ;
- travail en flexion pour des éléments fichés dans le sol : palplanches, paroi moulée ;
- avec des contraintes variables pour des éléments en forme de L ou de T renversé.

Ces techniques offrent une réponse adaptée aux fonctions de protection vis-à-vis des effets hydrauliques et de parement pour l'accostage sur les quais. Dans certains cas, des gabions peuvent également être utilisés. Ce choix dépend principalement des efforts à reprendre, de la nature du sol et des exigences d'insertion paysagère.

En temps normal, l'ouvrage est amené à exercer une fonction de soutènement tel que représenté en Illustration 12. Le mur de soutènement supporte non seulement la poussée du remblai mais aussi celle de l'eau contenue dans le remblai sous forme de nappe phréatique.

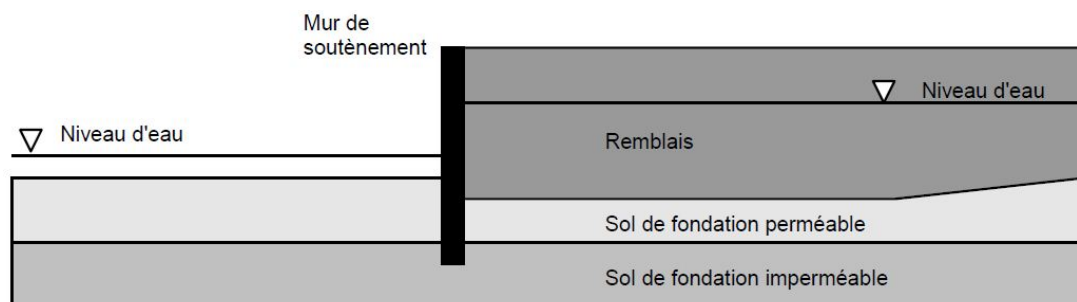


Illustration 12 : fonctionnement du soutènement en condition de poussée du remblai et de la nappe phréatique (adapté de [Ciria, Medde, Usace, 2013])

Dans le cas où l'ouvrage n'est pas complètement remblayé, la mise en charge de la partie supérieure peut se faire côté eau tel que représenté en Illustration 13.

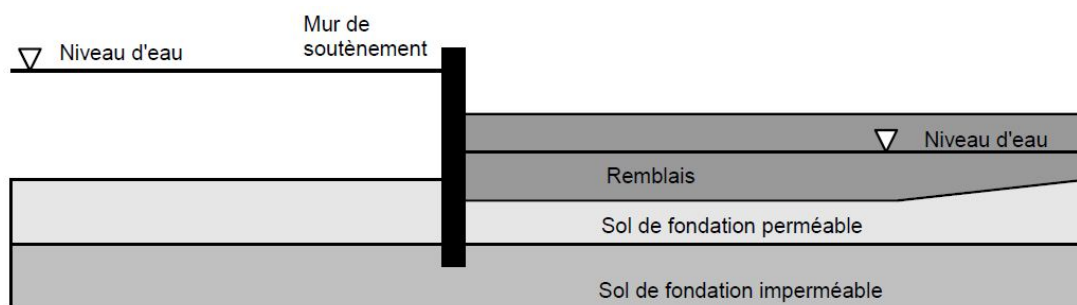


Illustration 13 : fonctionnement du mur soumis à la poussée de l'eau dans sa partie supérieure (adapté de [Ciria, Medde, Usace, 2013])

Des dispositifs amovibles (batardeaux) sont souvent insérés dans ces ouvrages pour permettre des passages hors période de crise. Ces dispositifs doivent bien sûr être en mesure de reprendre les mêmes sollicitations hydrauliques et mécaniques que les ouvrages dont ils assurent la continuité.

2.3.1.3 Épis

Les épis sont des ouvrages perpendiculaires au rivage dont l'objectif est de capter une partie des sédiments de la dérive littorale. Ils sont en général utilisés « en batterie » sur des linéaires importants.

Le tracé en plan des épis est généralement rectiligne, mais des épis en Y, en L ou en T sont également utilisés dans des conditions de faible marnage. Le profil en travers d'un épi s'apparente au profil en travers d'une digue, à la différence près que, l'ouvrage étant submersible et soumis au déferlement de la houle, il doit être protégé de toutes parts, sur les deux talus et sur la crête (cf. Illustration 14). Certains épis de faible hauteur ne sont constitués que d'enrochements. D'autres épis constitués de géotextiles remplis de sable ont également pu être implantés au cours des dernières décennies. Plus rarement les épis sont constitués par une file de pieux en bois. Le profil en long des épis rectilignes présente généralement une inclinaison.

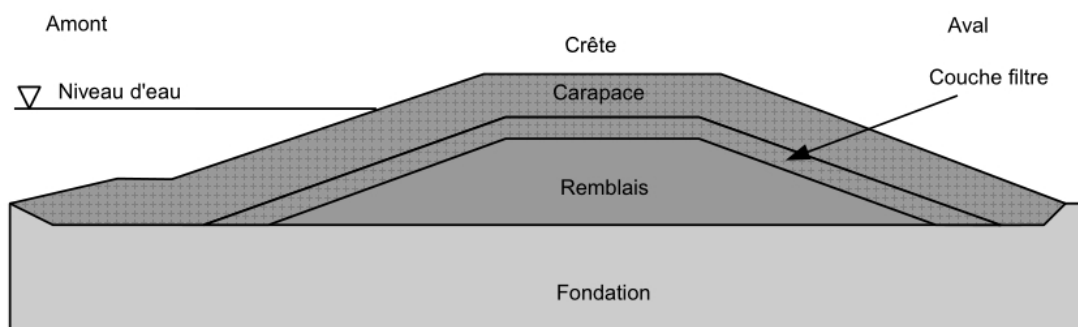


Illustration 14 : coupe-type d'un épi
(adapté de [Ciria, Medde, Usace, 2013])

L'accumulation de sable sur les épis peut engendrer une interruption du transit sédimentaire et des phénomènes d'érosion en aval du site sur lequel ils sont positionnés, en particulier lorsque leur construction n'est pas accompagnée d'un rechargement [National Research Council, 1987].

2.3.1.4 Brise-lames et butées de pied

Les brise-lames sont des ouvrages positionnés en bas d'estran, orientés parallèlement au trait de côte, et non rattachés à celui-ci. Ils sont souvent émergents à la surface (au moins pendant la majeure partie du cycle de marée). Il est important de noter que l'implantation des brise-lames forme une ligne discontinue, l'écart séparant chacune des structures étant approximativement équivalent à leur longueur. Cette longueur est habituellement environ égale à la distance qui les sépare du rivage, soit 200 à 300 mètres.

Leur profil en travers s'apparente le plus souvent à celui des épis : une structure « à talus » avec noyau en tout-venant et carapace en enrochements (cf. Illustration 15). Mais il existe aussi des caissons bétonnés posés directement sur le fond et un nouveau type d'ouvrage constitué de géotextiles remplis de sable est de plus en plus utilisé.



Illustration 15 : brise-lames de Valras-Plage
(auteur : DREAL LR)

Les brise-lames sont conçus pour diminuer l'énergie de la houle incidente en créant un déferlement en amont du trait de côte. Cette perte d'énergie en arrière de l'ouvrage permet aux sédiments en transit de s'accumuler, créant parfois un tombolo artificiel.

Un autre type d'ouvrage existe, toutefois très peu utilisé : la butée en pied de plage. Ces ouvrages sont parallèles au rivage, à moins de 100 mètres de la plage [Cete Méditerranée, mars 2011]. D'une conception proche de celle des brise-lames, ils sont immergés et leur fonction principale n'est pas de limiter directement la propagation de la houle à la côte, mais de réduire la pente de la plage et d'éviter ainsi le départ de sable au large (un effet indirect sur la propagation de la houle à la côte existe, du fait du déferlement des vagues à la remontée des fonds).

Enfin des butées constituées d'ouvrages en géotextile remplis de sable peuvent aussi être positionnées en pied de dune.

2.3.2 Adaptation au changement climatique

Les effets du changement climatique diffèrent selon que l'on considère les ouvrages longitudinaux de haut de plage (perrés, murs et ouvrages de soutènement), de bas de plage (brise-lames) ou les ouvrages transversaux (épis). Néanmoins, tous subiront des détériorations ou une perte d'efficacité avec une capacité réduite d'adaptation.

Effet du changement climatique sur les perrés, murs et ouvrages de soutènement

La surélévation du niveau de la mer peut engendrer des contraintes supplémentaires sur les perrés, murs et ouvrages de soutènement :

- en tête : augmentation des contraintes hydrostatiques et dynamiques, débordement et franchissement en arrière de l'ouvrage ;
- en pied : augmentation de la puissance des vagues induisant des affouillements.

[Griggs, 2005] signale par ailleurs qu'une surélévation du niveau de la mer face à ces structures fixant la position du trait de côte, conduit à noyer la plage devant les structures, ce qui correspond à des pertes d'habitats naturels et d'espaces récréatifs.

Effet du changement climatique sur les épis

La hausse du niveau de la mer peut réduire l'efficacité d'un épi par :

- des phénomènes d'affouillement à sa racine : un abaissement de l'estran ou un recul de la dune sur laquelle est enraciné l'épi peut conduire à un contournement de l'épi par le haut. Il en résulte la formation d'une fosse d'érosion susceptible de déstabiliser l'épi ;
- sa submersion. Dans ces conditions, l'épi n'assure plus avec la même performance la limitation des courants littoraux et par conséquent la stabilisation de l'estran s'en trouve réduite [National Research Council, 1987].

Effet du changement climatique sur les brise-lames

La hausse du niveau marin réduira les capacités protectrices des brise-lames :

- par contournement : la diffraction des vagues derrière la structure augmentera leur énergie au niveau du front de mer ;
- par dépassement : les franchissements augmenteront en fréquence et en énergie [National Research Council, 1987].

3. Méthodologie d'analyse des coûts observés

Pour éclairer le lecteur sur la façon dont les valeurs chiffrées ont été obtenues, nous apportons ici quelques explications essentielles sur les principes méthodologiques adoptés : la recherche des informations, leur classification destinée à favoriser les points de comparaison et le traitement des données pour l'estimation des coûts.

3.1 UNE MÉTHODOLOGIE DIFFÉRENCIÉE PAR TYPE D'OPÉRATION

Les interventions sur le littoral mobilisent une multitude d'acteurs et s'effectuent selon des montages d'opérations très diversifiés :

- marchés de prestations intellectuelles et marchés de travaux attribués par une collectivité territoriale pour adapter un système d'endiguement ou pour modifier l'aménagement du littoral. Ces opérations peuvent globalement être qualifiées d'opérations d'investissement ;
- interventions « en régie » de la part des gestionnaires de systèmes d'endiguement ou de la part de l'ONF sur les cordons dunaires. Ces opérations visent à la gestion et à l'entretien des structures naturelles ou anthropiques ;
- marchés de surveillance et maintenance, en particulier pour les géotubes ou encore les dispositifs Écoplage® et les systèmes de *by-pass*. Pour ces deux derniers s'ajoutent des frais de fonctionnement.

Les coûts présentés dans les sections suivantes résultent de l'analyse des marchés de prestations intellectuelles, des marchés de travaux et des contrats de maintenance, c'est-à-dire qu'ils correspondent aux coûts réels et non à des estimations.

Étant donné la diversité des montages d'opération, la méthodologie a été adaptée pour obtenir dans chaque cas de figure une information aussi précise que possible et pour conserver au mieux cette précision au terme de l'analyse. Dans cette perspective ont été entreprises les démarches suivantes :

- l'élaboration de cadres communs d'analyse, pour pouvoir comparer des opérations appartenant à la même catégorie sur la même base. Ces cadres ont ainsi été produits pour les opérations de gestion du trait de côte, pour les systèmes d'endiguement (cadres d'analyse décrits en section 3.2) et pour tous les types d'interventions particulières auxquels le présent rapport s'intéresse ;
- la sollicitation des acteurs en charge des dossiers pour obtenir des données globales de coût en rapport exact avec les projets considérés. Ainsi pour toutes les dépenses hors marché de travaux, les maîtres d'ouvrage ont souvent contribué à apporter directement les chiffres synthétiques recherchés. L'exploitation des marchés de travaux, plus fastidieuse mais s'appuyant sur un nombre restreint de documents (les pièces essentielles des marchés de travaux) a été effectuée suivant le mode opératoire détaillé en section 3.3 ;
- concernant les dunes, le rapport d'activité de l'Office national des forêts [ONF, 2014] éclaire sur la majeure partie des interventions (qui concernent la façade atlantique). La stratégie d'étude a donc consisté à exploiter ce rapport pour en tirer des coûts moyens puis à confronter ces chiffres aux coûts observés sur des interventions réalisées sur la façade méditerranéenne par l'Entente interdépartementale de démoustication [EID Med, 2013].

3.2 CADRES D'ANALYSE DÉDIÉS AUX OPÉRATIONS GLOBALES

3.2.1 Analyse des opérations de gestion du trait de côte

Les opérations de gestion du trait de côte ont bénéficié en section 4 d'un cadre commun d'analyse adapté. Les collectivités territoriales ont été sollicitées pour renseigner un tableau établissant la répartition du montant global des dépenses entre :

- études préparatoires et phase travaux (assistance à maîtrise d'ouvrage (AMO), évaluation environnementale, concertation, maîtrise d'œuvre (MOE), topographie, coordination en matière de sécurité et de protection de la santé (SPS) ;
- acquisitions foncières ;
- travaux sur les différents types d'intervention à caractère côtier (une ligne par type d'intervention suivant la typologie du présent rapport : interventions sur plages, dunes, ouvrages de génie civil) ;
- travaux de voirie réseaux divers (VRD) (pour les opérations comprenant un volet terrestre) ;
- travaux relatifs aux bâtiments (idem).

3.2.2 Analyse des projets de protection contre les submersions marines

Une première phase de l'étude en section 5 a consisté à analyser les programmes d'actions de protection contre les submersions marines, en se focalisant sur les mesures structurelles (hors amélioration de la connaissance et de la conscience du risque, prévision et alerte, plan d'urbanisme...). Ces mesures structurelles englobent des actions très variées qui touchent non seulement aux digues mais également à des travaux sur des ouvrages hydrauliques, à des rechargements de plages, à des ouvrages de génie civil... Ces analyses se sont appuyées sur une sélection de dossiers présentés à la Commission mixte inondation (CMI). La sélection s'est effectuée sur la base de deux critères :

- un état d'avancement suffisant des opérations garantissant une bonne précision dans la définition des coûts ;
- une diversité de sites assurant une bonne représentativité des situations existantes au niveau national.

De même que pour les opérations de gestion du trait de côte, les systèmes d'endiguement ont bénéficié d'un cadre commun d'analyse adapté. Quatre « postes » ont été distingués :

- la construction ou reconstruction, le renforcement et la rehausse des digues ;
- les travaux sur perrés et épis et le rechargement de sable ;
- les travaux sur les digues de retrait ;
- les interventions sur les ouvrages hydrauliques (portes à marée et dispositif de ressuyage (vannage, ouvrages de drainage)).

La comparaison de ces dossiers fait ressortir une orientation très variable des dépenses sur les différents postes selon les sites et la diversité des stratégies.

Une seconde phase de l'étude en section 8 a consisté à étudier plus précisément les dépenses sur les digues, à savoir, en plus des marchés de travaux :

- la part des prestations intellectuelles et des acquisitions foncières dans les dépenses d'investissement (section 8.4) ;
- les dépenses linéaires annuelles moyennes de gestion et d'entretien.

3.3 CADRES D'ANALYSE DES MARCHÉS DE TRAVAUX

L'analyse des marchés de travaux a pu être menée suivant les territoires :

- soit en cohérence et dans le prolongement des réflexions menées à une échelle globale sur les deux types d'opération mentionnés précédemment, à savoir les opérations de gestion du trait de côte et les projets de protection contre les submersions marines ;
- soit de façon plus indépendante sur d'autres parties du littoral où, pour différentes raisons (par exemple parce que la côte est très découpée ou parce que les enjeux sont dispersés), des interventions plus localisées ont été entreprises.

La décomposition des opérations globales aboutit naturellement à une série d'interventions qui sont en général comparables techniquement aux interventions plus ponctuelles. Les interventions particulières apparaissant dans les opérations globales ont donc été analysées conjointement avec les interventions engagées localement dans le cadre d'opérations isolées.

Dans tous les cas, les marchés de travaux ont été étudiés suivant un mode opératoire précis qu'il convient d'explicitier ici pour éclairer le lecteur sur la signification exacte des chiffres. Ainsi la présente section apporte des informations fondamentales sur :

- les valeurs recherchées au travers des analyses ;
- la classification des opérations ;
- le mode opératoire d'analyse des données (conventions utilisées pour l'analyse et l'actualisation des coûts) ;
- la forme de restitution des résultats (ordonnancement et valeurs significatives).

À la suite de ce travail d'analyse, les résultats obtenus ont été confrontés aux résultats d'autres études menées en France et à l'étranger.

3.3.1 Valeurs recherchées au travers de l'analyse

Quelle que soit la finalité des travaux, l'analyse vise à obtenir d'une part son coût global et d'autre part une décomposition de ce coût suivant les techniques employées. L'étude des marchés de travaux permet d'atteindre cet objectif et de conclure :

- sur le coût associé à l'intervention : les marchés de travaux prennent en compte les contraintes sur le plan opérationnel et les contraintes d'intégration de l'ouvrage dans son environnement (rappelons cependant que les marchés de travaux n'intègrent toutefois pas les coûts relatifs aux prestations d'étude et de suivi de travaux, ni aux acquisitions foncières et autres interventions spécifiques... Il faut poursuivre le calcul suivant les recommandations de la partie 1.3.) ;
- sur le coût des différentes techniques utilisées en agréant les coûts qui s'y rapportent dans les détails estimatifs.

S'agissant du coût global de l'opération, il est recherché un coût au mètre linéaire. Le coût pris en compte pour cette estimation est le coût total.

S'agissant du coût des différentes techniques, il est recherché un coût unitaire qui soit propre à la technique considérée : coût au mètre cube de sable déplacé, coût à la tonne d'enrochements, coût au mètre cube de béton... Le cas échéant, un coût au mètre linéaire ou au mètre carré peut aussi être recherché, notamment dans le cas des parements ou des écrans. Ce coût unitaire intègre l'ensemble des coûts intrinsèquement liés à la technique. Par exemple :

- pour les palplanches, seront pris en compte la fourniture, la mise en fiche, le battage et le recépage des palplanches ;
- pour le béton seront pris en compte le coffrage, la fourniture et la mise en œuvre du béton. S'il s'agit d'un béton armé, s'ajoutent notamment la fourniture, le façonnage des armatures, leur calage dans le coffrage.

Ces deux approches complémentaires sont représentées sur l'illustration 16.

Montant total du marché		
Unité €/ml HT		
Coût technique n°1	Coût technique n°2	Coûts annexes
Exemple : Terrassement, Unité : €/m ³	Exemple : Enrochement, Unité : €/T	Installation, accès, Ouvrages traversants, Signalisation, ...

Illustration 16 : composition du coût dans le cas de deux techniques identifiées

Dans le domaine fluvial, des études spécifiques ont été menées sur les terrassements et les maçonneries, car ces domaines font l'objet de travaux très divers. Le lecteur est invité à se reporter au volet fluvial de l'étude [Cerema, 2014] pour plus de précisions sur ces deux types de travaux.

3.3.2 Classification des opérations

Passé l'étape de décomposition des opérations globales, l'analyse repose sur une classification des interventions. Cette classification est tout d'abord effectuée suivant la typologie des structures :

- les formations naturelles ou partiellement anthropisées : plages et cordons dunaires ;
- les ouvrages à vocation spécifique de protection contre les submersions marines, c'est-à-dire les digues ;
- les ouvrages de génie civil : perrés, murs et ouvrages de soutènement, épis, brise-lames et butées de plage ou de pied de dune.

D'autres classifications sont ensuite opérées qui dépendent du type d'aménagement :

- pour les plages, le rechargement, le transfert hydraulique ou le dispositif Écoplage® ont chacun fait l'objet d'analyses particulières ;
- pour les cordons dunaires, l'étude distingue entre création, réhabilitation ou confortement, et entretien ;

- pour les digues, la première étape de classification consiste à distinguer les digues avec parement des digues sans parement. La deuxième étape de classification consiste à distinguer entre les opérations de « construction, reconstruction ou réfection », « confortement » et « entretien et réparation ». La troisième étape consiste à distinguer entre les techniques utilisées ;
- pour les ouvrages de génie civil, la première étape de classification consiste à distinguer entre les types d'ouvrages (perrés, murs et ouvrages de soutènement, épis, brise-lames et butées de pied). Les deuxième et troisième étapes sont les mêmes que celles suivies pour les digues.

Ces aiguillages orientent donc les opérations recensées vers des tableaux consacrés à un type d'intervention, tableaux dans lesquels chaque opération recensée occupe une ligne. Ces tableaux se trouvent en annexe.

3.3.3 Mode opératoire d'analyse des données

Pour garantir un traitement rigoureux de l'information, l'analyse des données s'appuie sur :

- des conventions comptables permettant le calcul des coûts unitaires sur la base de quantités bien définies ;
- une règle d'actualisation des prix.

L'ANNEXE A apporte quelques précisions supplémentaires sur la constitution des tableaux d'analyse des coûts des interventions.

3.3.3.1 Conventions utilisées pour l'analyse

Il est important de noter la définition des coûts unitaires utilisés afin d'avoir une compréhension juste des quantités auxquelles ils se réfèrent :

- les coûts du **béton et des gabions** sont exprimés par mètre cube « tout compris » : fourniture, transport, coffrage et mise en œuvre ;
- les coûts des **enrochements** sont exprimés par tonne et comprennent leur fourniture, leur transport et leur mise en œuvre. Est prise en compte la masse présente *in fine* dans l'ouvrage (lorsqu'une quantité importante d'enrochements est réutilisée sur place, ce point est mentionné) ;
- **le coût des terrassements au mètre cube est calculé comme un coût moyen pour tous les mouvements de matériaux en déblais et en remblais.** Pour déterminer ce volume, il faut considérer l'ouvrage comme un système dans lequel entrent et duquel sortent des matériaux, chaque mouvement d'entrée ou de sortie étant comptabilisé et valorisé. **Le volume pris en compte n'est donc pas le volume de matériau présent *in fine* dans l'ouvrage.** Pour plus de précision sur ce sujet, se référer au volet fluvial [Cerema, 2014] qui consacre un chapitre aux terrassements ;
- les coûts de maçonnerie sont exprimés au mètre cube ou au mètre carré et peuvent comprendre des prestations très variées : réfection avec réutilisation ou sans réutilisation des matériaux, simple rejointoiement ou rejointoiement avec ragréage des cavités et injection de fissures :
 - dans le cas de la réfection, la surface concernée est prise en compte ;
 - dans le cas du rejointoiement, qu'il s'accompagne ou non de ragréage ou d'injection, la surface de rejointoiement est prise en compte pour l'ensemble.

3.3.3.2 Actualisation des coûts

Les prix sont actualisés à l'aide de l'indice TP02 relatif aux ouvrages d'art en sites terrestre, fluvial et maritime.

De 1975 à 2013, ces index étaient publiés et calculés par le ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. En 2014, l'Insee a récupéré la maîtrise d'ouvrage de ces index, en conservant provisoirement la méthodologie générale, les pondérations et l'année de référence. Dans la logique des indicateurs de court terme de l'Insee, un « changement de base » mettant à jour tous ces aspects méthodologiques a lieu tous les cinq ans. À partir de janvier 2015, les index travaux publics sont donc présentés en base 2010, avec des premières valeurs définitives disponibles uniquement dans cette base se rapportant à octobre 2014. Une table de correspondance munie de coefficients de raccordement permet d'utiliser ces nouveaux indices dans le cadre de contrats d'indexation faisant référence aux anciens indices, cessés aux valeurs de septembre 2014 [<https://www.bdm.insee.fr/bdm2/index>].

Les index en base antérieure à 2010 sont cessés, mais, comme pour tout changement de base, l'Insee propose systématiquement une « série correspondante » en face de chaque « série arrêtée », avec la règle de calcul suivante :

- avant le changement de base, c'est-à-dire jusqu'à septembre 2014 inclus, l'ancienne série est directement accessible et fait foi ;
- à partir du changement de base, c'est-à-dire depuis octobre 2014 inclus, l'ancienne série peut être prolongée de la manière suivante : la série correspondante doit être multipliée par un coefficient de raccordement (en l'occurrence 6,5839) puis le produit ainsi obtenu arrondi à une décimale.

Dans le cadre de la présente étude, nous choisissons d'actualiser nos valeurs à la date d'octobre 2014 qui devrait servir de date de référence pour le prochain changement d'indice prévu en janvier 2020 et qui adoptera des dispositions équivalentes aux précédentes, à savoir une nouvelle série d'indices débutant en octobre 2019 dont la valeur est 100 en 2015 (avec les trois mois nécessaires à la publication des valeurs définitives, la date de référence réelle sera octobre 2014.)

L'indice base 2010 d'octobre 2014 étant 106,4 et le coefficient de raccordement étant 6,5839, la valeur d'indice de l'ancienne série prend la valeur du produit de ces deux termes, soit 700,5.

En conclusion, dans notre étude, tous les prix sont exprimés en euros et hors taxes. Ils ont été actualisés à la valeur d'octobre 2014. Il suffit donc à l'utilisateur de cette étude pour réactualiser les valeurs qui y figurent :

- sur la période 2015-2020 : de diviser par 106,4 (valeur de l'indice d'octobre 2015) et de multiplier par le dernier indice paru (indice base 2010).
- sur la période 2020-2025 : de diviser par 100 et de multiplier par le dernier indice paru (indice base 2015).

3.3.4 Forme de la restitution des résultats

3.3.4.1 Ordonnancement des résultats de l'analyse

Les résultats de l'analyse sont présentés dans des parties distinctes tel qu'indiqué dans la Présentation générale de l'étude, à la section Forme de restitution de l'étude.

Les coûts observés sur les opérations sont restitués sous la forme de tableaux synthétiques affichant les valeurs basses, moyennes et hautes. En complément des fourchettes de coûts présentées, des commentaires sont apportés pour une bonne compréhension des chiffres, ce qui se traduit en termes de présentation par :

- des tableaux synthétiques donnant une lecture immédiate des coûts unitaires ;
- un volet de présentation détaillée pour les lecteurs soucieux d'obtenir une plus grande précision dans leurs estimations.

Par ailleurs une présentation transversale des coûts globaux et des coûts observés sur les différentes techniques est proposée en partie 10, respectivement pour répondre au fait :

- que plusieurs types d'aménagements peuvent traiter d'une problématique commune (par exemple : protection contre l'érosion ou protection contre les submersions marines) ;
- qu'une même technique (terrassement, enrochements, béton, béton armé...) peut être utilisée sur différents types d'aménagement.

Ce regard transversal a le double avantage de nous assurer que les coûts sont cohérents entre eux et de permettre à l'utilisateur de ce guide de comparer les solutions entre elles.

3.3.4.2 Les chiffres retenus et leur expression

Quelle que soit la valeur recherchée, le degré d'incertitude sur les chiffres retenus est exprimé en donnant, lorsque la taille de l'échantillon le permet, trois coûts actualisés : minimum, moyen et maximum. Pour la lecture des tableaux, les symboles suivants sont adoptés :

CAMini = coût actualisé minimum

CAMoy = coût actualisé moyen

CAMaxi = coût actualisé maximum

L'analyse est menée dans le but de restituer les fourchettes des coûts réellement observés, c'est-à-dire en n'écartant que très exceptionnellement des valeurs (une valeur n'est écartée que si un facteur particulier a été identifié). Les tableaux synthétiques peuvent donc faire apparaître, dans certains cas, un rapport de 1 à 5 entre le minimum et le maximum.

Lorsque des écarts sensibles existent entre un minimum et un maximum, les facteurs explicatifs sont recherchés. Ils sont retranscrits dans l'analyse détaillée qui donne ainsi des clefs pour apprécier plus précisément le coût d'une opération suivant ses caractéristiques propres.

3.3.5 Facteurs influençant les coûts

L'analyse d'un vaste ensemble d'opérations nécessite une approche systématisée, c'est-à-dire l'adoption de cadres d'analyse valables pour des groupes d'opérations. Cette systématisation conduit donc à porter l'effort d'investigation sur les « dénominateurs communs » aux opérations. Cependant tous les facteurs intervenant dans la définition des coûts ne peuvent être pris en

compte de manière exhaustive pour chaque type d'intervention. Cette section renseignera le lecteur sur ce qui a pu être intégré dans l'analyse (les facteurs dits explicites) et ce qui n'a pas pu l'être (les facteurs dits implicites).

3.3.5.1 Des facteurs explicites

Sur les coûts linéaires et surfaciques des ouvrages, **les dimensions** des ouvrages sont un facteur prépondérant. La recherche des dimensions des ouvrages a été menée de façon systématique et la relation entre coût et dimensions est souvent apparue très clairement.

La composition, voire le dimensionnement des ouvrages ont également été recherchés, par exemple les volumes de sable, le type et l'épaisseur des revêtements, la taille des enrochements...

Les projets nécessitent couramment de créer des **ouvrages annexes** correspondant à la gestion des écoulements (buse, vanne...) ou à d'autres usages, des infrastructures de transport et des réseaux notamment. Ces éléments ont été identifiés et un tri a été effectué pour que ces ouvrages ne soient pas pris en compte dans la recherche du **coût des techniques**. Par contre, il a semblé pertinent de les prendre en compte dans le coût de l'opération globale pour refléter au mieux le **coût total** observé sur une opération de travaux.

La disponibilité des matériaux et l'accessibilité au site sont deux autres facteurs qui ont été intégrés explicitement dans les analyses.

3.3.5.2 Des facteurs implicites

Quels que soient les coûts unitaires considérés, la nature du sol et les contraintes hydrauliques exercent une influence certaine dans le coût d'une opération. Dans l'absolu, ces éléments conditionnent même souvent la nécessité de procéder à une intervention. Cependant ces facteurs n'ont pu être pris en compte qu'implicitement : l'impossibilité pour chaque opération recensée de connaître précisément les caractéristiques du sol et les contraintes hydrauliques ne permet pas en effet de déterminer leur influence sur les coûts. L'utilisateur de cette étude doit donc avoir apprécié par lui-même les dispositions techniques qui répondent à ces contraintes pour que le présent document puisse l'aider à en préciser le coût.

Il faut par ailleurs être conscient que des facteurs de natures diverses interviennent dans la définition des coûts sans que l'étude puisse prétendre les appréhender tous. Il nous semble important de bien préciser que les éléments ci-dessous ont une grande influence sur les coûts et sont souvent eux-mêmes en interaction.

On peut distinguer :

- d'une part les facteurs liés à l'organisation et au contexte économique :
 - modalités de consultation,
 - situation concurrentielle des entreprises et conjoncture économique,
 - cours des matières premières,
 - optimisation des moyens et des fournitures (une entreprise de travaux peut dans certains cas faire bénéficier le chantier considéré de ses opérations en amont ou en aval),
 - opportunités dépendant des offres des fournisseurs,
 - ...

- d'autre part les facteurs liés aux conditions matérielles :
 - caractéristiques attendues des matériaux (ce qui peut amener à optimiser les coûts en jouant sur les performances mécaniques et les quantités, par exemple),
 - méthodologie de pose,
 - coût de transport (distance des carrières pour les enrochements notamment),
 - volumes commandés,
 - possibilité de recourir à des matériaux de réemploi,
 - choix de la période d'intervention,
 - coûts d'immobilisation dus aux intempéries,
 - ...

On notera qu'un certain nombre des paramètres ci-dessus sont liés au projet et au contexte local, d'autres sont liés au cadre économique général.

4. Coûts observés sur les opérations globales de gestion du trait de côte

Répondre aux objectifs de gestion intégrée des zones côtières et gérer les aléas littoraux à une échelle adaptée impliquent d'engager des opérations globales d'aménagement. La présente section porte sur les dépenses observées sur les sites dont la problématique principale est celle de la gestion de l'estran et des dunes en lien avec le transit sédimentaire. D'autres sites sont dominés par des problématiques d'endiguement. Les dépenses associées à ces sites seront étudiées dans la partie 8.

Les opérations abordées ici consistent à recharger des plages, à restaurer des cordons dunaires, à déployer des ouvrages utilisant des géotextiles mais dans certains cas aussi à conforter voire à créer des ouvrages de génie civil traditionnels. Suivant la nature des enjeux à protéger et l'intensité des phénomènes naturels, la stratégie peut consister à « durcir les positions » ou au contraire à les « assouplir ».

Cette partie apporte un éclairage sur le coût des interventions dans le cas où sont entrepris des changements radicaux. Sur de tels « scénarios de rupture », il est conseillé néanmoins pour affiner les estimations de mener l'analyse à l'échelle des composants de l'aménagement (parties 6 à 9) pour mieux apprécier les dépenses correspondantes.

Cette partie exploite principalement les coûts observés sur les opérations de grande envergure menées ces dernières années en Occitanie, et notamment sur les lidos. En complément, en Nouvelle-Aquitaine, l'opération de Capbreton, qui comprend plusieurs mesures (dont la mise en place d'un système de transfert hydraulique du sable), peut être placée au même rang. Les opérations se caractérisent alors par les conditions suivantes :

- une côte présentant un long linéaire sableux ;
- une urbanisation en retrait représentant de forts enjeux ;
- une artificialisation du littoral par des ouvrages réfléchissant la houle ou interrompant le transit sédimentaire.

Sur ce dernier point, rappelons que le littoral d'Occitanie a connu une vaste opération d'aménagement (mission Racine) sur la période 1964-1980. Les « infrastructures collectives », terme qui englobe un ensemble d'opérations dépassant largement la seule protection contre les aléas littoraux, avaient été financées par l'État à hauteur de 790 M€ 2010 [Cyril Vanroye, Chloe Auffret, 2010], soit 840 M€ 2014. Il s'agissait de développer cinq grandes unités touristiques (cf. Illustration 17).

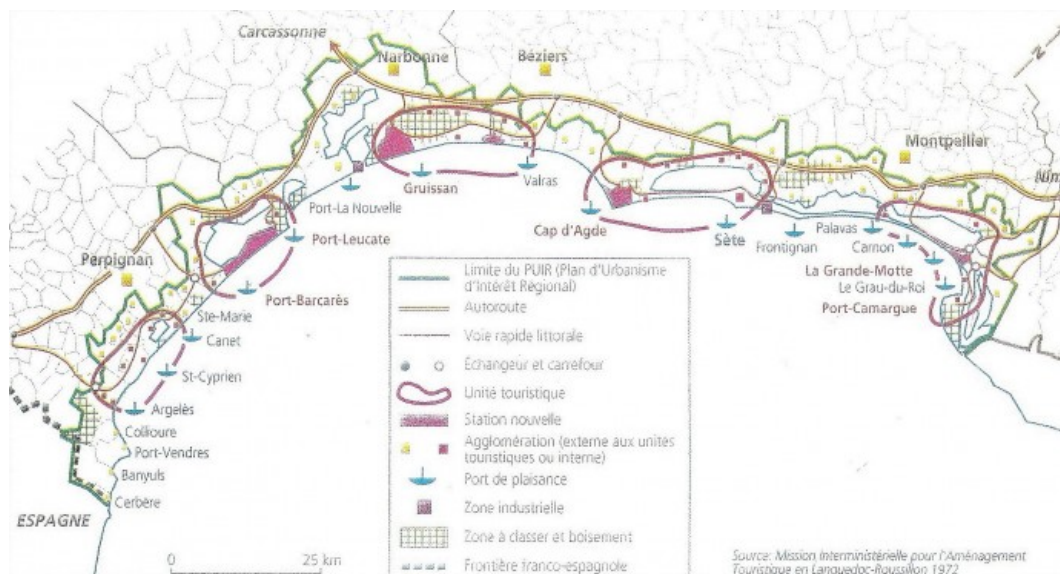


Illustration 17 : plan d'aménagement du littoral du Languedoc-Roussillon
(source : Rémy Knafou (sous la direction de), *Tourisme et Loisirs, Atlas de France, vol 7*, Reclus-La Documentation Française, 1997)

En 2010, la somme des seules dépenses d'aménagement du littoral d'Occitanie comptabilisée depuis 1948 représentait environ 125 M€ (2014). Cette somme comprend l'investissement sur les 280 ouvrages de protection contre les aléas littoraux mais également, à hauteur de 40 %, le premier rechargement de sable massif sur le golfe d'Aigues-Mortes (9,3 M€ 2014) et surtout le recul stratégique dans le cadre de l'opération d'aménagement et de protection du lido de Sète à Marseillan (trois tranches de travaux : 43,6 M€ 2014). En complément, le montant du Contrat de Plan État Région (CPER) 2007-2013 prévoyait un montant d'investissement global de 100 M€ 2007 soit 120 M€ 2014 au titre des opérations d'aménagement du littoral.

Ces chiffres montrent à quel point les opérations impulsées par la mission interministérielle à partir de 2006 ont marqué un tournant dans l'aménagement du littoral d'Occitanie, puisque, pour mettre un terme aux effets indésirables des anciens dispositifs de « défenses contre la mer » et répondre au besoin de renaturation, les dépenses sur la période 2007-2014 sont équivalentes à celles sur la période 1948-2010.

Dans ce contexte, nous présenterons dans un premier temps **une analyse comparée du coût linéaire des stratégies d'aménagement du littoral (évolution naturelle, restauration de l'équilibre naturel et modification du transit sédimentaire)** sur un horizon de trente ans. Nous nous appuyons pour cela sur les résultats de l'étude [Cete Méditerranée, mars 2011].

Dans un second temps, nous étudierons plus précisément les **coûts d'investissement associés aux opérations destinées à restaurer l'équilibre naturel du littoral**. Une décomposition du coût de ces opérations sera présentée. Pour cette seconde phase, il sera distingué entre les opérations comportant un volet terrestre d'aménagement (travaux de voirie et réseaux divers conséquents) et les opérations sans volet terrestre, les travaux se concentrant dans ce cas sur l'estran et le « trait de côte ». L'analyse sera menée de telle sorte qu'en phase de synthèse les comparaisons puissent porter sur les dépenses associées :

- aux prestations d'études et de suivi,
- aux travaux terrestres d'aménagement,
- aux travaux de rechargement de l'estran,
- aux travaux de génie civil sur l'estran.

Les opérations en lien avec les autres stratégies (évolution naturelle et modification du transit sédimentaire) ne seront pas étudiées en détail dans cette section. En effet, les interventions menées dans le cadre de la stratégie d'évolution naturelle visent essentiellement au déplacement des enjeux et s'écartent notablement de l'objet de notre étude. Quant aux interventions destinées à modifier le transit sédimentaire, elles se rapportent principalement à l'aménagement et à la gestion des ouvrages de génie civil traités en partie 9.

4.1 ANALYSE COMPARATIVE DU COÛT GLOBAL DES STRATÉGIES D'AMÉNAGEMENT

L'étude [Cete Méditerranée, mars 2011] établit sur la base des coûts observés entre 1990 et 2010 une évaluation du coût prévisionnel sur trente ans (de 2009 à 2039) des aménagements côtiers en fonction de trois orientations stratégiques :

- évolution naturelle avec déplacement éventuel des enjeux menacés (enjeux faibles *a priori*) ;
- restauration de l'équilibre naturel par apport de sédiments (rechargement de plage, restauration de cordon dunaire, *by-pass*) ;
- modification du transit sédimentaire (épis, brise-lames...).

Ces orientations stratégiques ne s'appliquent pas uniformément à l'ensemble du littoral mais sont définies secteur par secteur pour tenir compte notamment des enjeux à protéger (cf. Illustration 18).

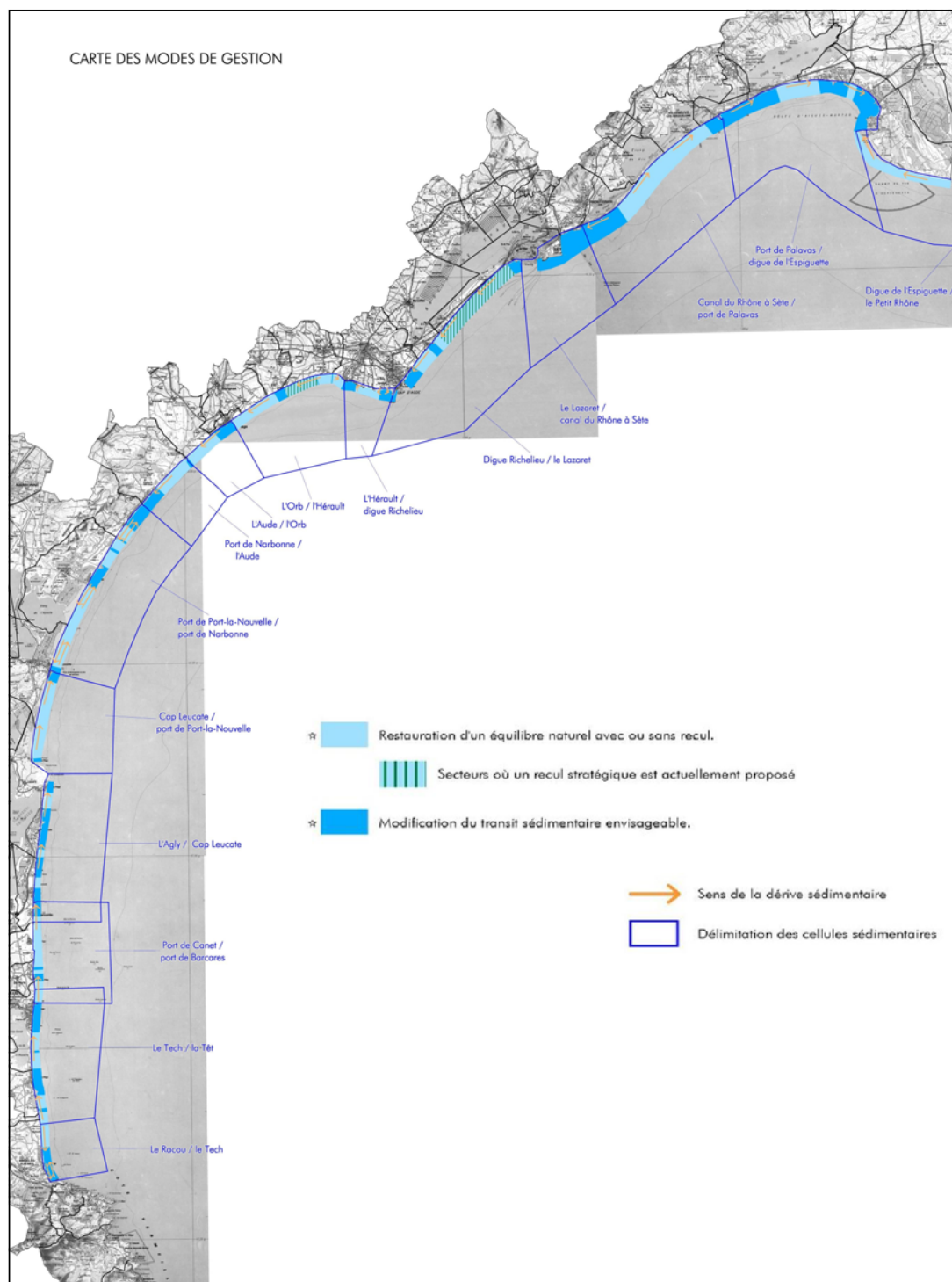


Illustration 18 : carte des modes de gestion
(source : [Cete Méditerranée, 2011])

Les principales conclusions de ce rapport, citées dans l'encart suivant, présentent l'intérêt d'établir une comparaison entre les coûts associés à ces trois modes de gestion.

Synthèse de l'évaluation des coûts de la protection des territoires littoraux en Occitanie [Cete Méditerranée, mars 2011]

Hypothèses

Le calcul des coûts globaux est basé sur un certain nombre d'hypothèses, dont les coûts linéaires associés à chaque type d'intervention. Nous ne les rappellerons pas ici dans la mesure où d'autres parties du rapport présentent des évaluations équivalentes. Par contre il semble utile de préciser deux hypothèses supplémentaires qui ont supporté le calcul du coût global actualisé, à savoir :

- pour les rechargements de sable, il a été pris en compte un rechargement de 50 m³/ml tous les dix ans ;
- pour les ouvrages de génie civil (pré-existants ou nouvellement construits) a été retenu un coût d'entretien équivalent à 1/15^e du coût de construction tous les deux ans.

Par ailleurs, deux scénarios ont été définis. Ces scénarios ne diffèrent que sur les secteurs auxquels est appliquée la stratégie de modification du transit sédimentaire. Selon les techniques utilisées (épis ou brise-lames), les coûts apparaissent plus faibles ou plus élevés et les scénarios correspondants sont alors qualifiés de « minimum » ou « maximum ».

Enfin, l'import massif de sable est une des caractéristiques marquantes des opérations menées en Occitanie. La région bénéficie dans ce domaine de conditions favorables puisque la flèche sous-marine de l'Espiguette (à l'extrémité est du littoral d'Occitanie) présente une accumulation importante de sable gênant l'accès à Port Camargue. Dans ce contexte, deux hypothèses sont adoptées concernant les rechargements de sable :

- les rechargements sont considérés par secteur indépendamment les uns des autres pour calculer leur coût, ce qui conduit vraisemblablement à une surestimation (une mutualisation des moyens permettrait des économies) ;
- des prélèvements de sable ont pu être opérés pour les premières opérations de rechargement sur la flèche de l'Espiguette [BRLi, ONF, EID, 2013]. Il est considéré que le littoral dispose d'une réserve suffisante en sable, ce qui n'est pas démontré (un risque de surcoût existe si cette hypothèse n'était pas vérifiée).

Coût linéaire global sur l'ensemble du littoral (tous secteurs confondus)

La protection du littoral du Languedoc-Roussillon pour les trente années à venir est estimée selon le scénario minimum à 351 M€ 2014 et à 398 M€ 2014 selon le scénario maximum.

Les investissements représentent près de 60 % du coût total, l'entretien des investissements sur 30 ans 27 % et l'entretien de l'existant sur 30 ans 13 % (des deux premiers pourcentages, il résulte que l'entretien des investissements sur 30 ans représente environ 45 % du coût de l'investissement).

La côte d'Occitanie s'étendant sur 164 km, le coût linéaire global de protection littorale sur une durée de 30 ans est compris entre 2,1 et 2,4 M€/km.

Coût linéaire par stratégie

Les coûts linéaires résultant sur 30 ans (valeur octobre 2014) de chacun des modes de gestion sont :

- pour l'option d'évolution naturelle (calcul sur 55 km), le coût d'investissement est estimé à 1,53 M€/km et le coût d'entretien et gestion à 0,06 M€/km ;
- pour l'option de restauration de l'équilibre naturel (calcul sur 51 km), le coût d'investissement est estimé à 0,32 M€/km et le coût d'entretien et gestion à 0,60 M€/km ;
- pour l'option de modification du transit (calcul sur 56,5 km), le coût d'investissement est estimé entre 1,92 M€/km et 2,44 M€/km et le coût d'entretien et gestion est estimé entre 1,90 M€/km et 2,21 M€/km.

Rythmes de dépense associés aux différentes stratégies

Chaque stratégie impliquant des rythmes de dépense différents et variables avec le temps, il n'est pas possible à partir de cet exemple de calculer pour chacune d'elle un unique coût linéaire annuel de gestion et d'entretien. Néanmoins, sur la base des chiffres précédents, le regard à un horizon de 30 ans peut aussi être porté sur un horizon plus lointain, ce qui permet une autre analyse comparative des stratégies :

Sur un horizon de 30 ans, le coût linéaire total de l'option d'évolution naturelle demeure élevé (1,6 M€/km) du fait du déplacement des enjeux. Sur le plus long terme, le coût d'entretien étant négligeable, cette option peut devenir intéressante.

Sur un horizon de 30 ans, l'option de restauration de l'équilibre naturel est moins coûteuse (coût total de 0,9 M€/km) que l'option de modification du transit (coût total compris entre 3,8 et 4,6 M€/km). Sur le plus long terme, les coûts de gestion et d'entretien associés à la restauration de l'équilibre naturel sont trois à quatre fois moins élevés que ceux de la modification du transit.

4.2 COÛTS D'INVESTISSEMENT DES OPÉRATIONS DE GESTION DU TRAIT DE CÔTE INTÉGRANT UN VOLET TERRESTRE

Les opérations traitées dans la présente section visent à redonner au rivage sa capacité naturelle à résister à l'érosion ainsi qu'un espace d'évolution en opérant :

- un déplacement des points durs et des équipements ;
- un « reprofilage » de la plage (pour atteindre une largeur suffisante) et un rétablissement du cordon dunaire.

Ce type de programme comporte un volet terrestre très conséquent sur le plan des acquisitions foncières et des travaux de voirie et réseaux divers.

4.2.1 Réhabilitation du lido de Sète à Marseillan

Entre Sète à l'est et Marseillan à l'ouest, le lido est une bande sableuse de 12 km de long et de 1 à 2 km de large qui sépare l'étang de Thau de la mer Méditerranée.



Illustration 19 : vue d'ensemble de l'opération sur le lido de Sète
(source : Thau Agglo)

Cette bande sableuse, siège de diverses activités (tourisme balnéaire, viticulture, vinification, camping) et axe de trafic majeur (voie ferrée et route littorale), était un site menacé par une érosion forte quasi généralisée et par une fréquentation intense et insuffisamment maîtrisée ; érosion notamment aggravée par la présence de la route en haut de plage. La recherche d'une solution de protection et d'aménagement durable du lido a mené les collectivités à retenir en 2004 la solution du recul stratégique des enjeux et de restauration de l'équilibre naturel du milieu. Cela consiste à déplacer la voie littorale contre la voie ferrée et à reconstruire une plage « active » en réhabilitant les cordons dunaires [Cete Méditerranée, 2011].

Ce parti d'aménagement s'est traduit par la mise en place d'une opération organisée en deux programmes [Thau Agglo, 2010] :

- un programme terrestre et littoral consistant à :
 - déplacer la route littorale contre la voie ferrée ;
 - restaurer la plage et reconstituer le cordon dunaire en utilisant le sable situé sous la route déplacée (opération réalisée sur 10 000 m) ;
 - créer une piste cyclable en arrière du cordon dunaire ;
 - réaliser quatre aires de stationnement identifiées et des équipements d'accueil ;
- un programme maritime sur la partie nord du Lido, secteur en forte érosion et où le recul de la route ne peut être que limité. Ce programme comprend :
 - l'expérimentation du procédé Écoplage® (sur 700 m) ;
 - l'expérimentation de l'ouvrage atténuateur de houle (géotubes immergés sur 1 000 m) associé à un rechargement de la plage immergée pour un volume représentant au moins dix ans d'érosion ;
- le rechargement de la plage émergée pour atteindre une plage d'une largeur de 70 m sur tout le linéaire (opération réalisée sur 2 200 m).

Les techniques mises en œuvre pour l'apport du sable destiné à la plage et au cordon dunaire sont différentes :

- pour le rechargement de plage, environ 350 000 m³ ont été prélevés à la pointe de l'Espiguette par une drague aspiratrice en marche (DAM) et ramenés par bateau de dragage avec un refoulement sur la plage du lido de Sète ;
- pour la création du cordon dunaire, 89 000 m³ sur les 130 000 m³ nécessaires ont été prélevés en « aval dérive » et au niveau du soubassement de l'ancienne route (opération réalisée en 2008).

Le rechargement de plage n'a été effectué qu'à « l'abri » de l'atténuateur de houle et il sera possible de comparer dans le temps l'efficacité du duo « atténuateur en tubes géotextiles/ rechargement en sable » et le procédé « Écoplage® » qui lui, n'a pas été renforcé par un apport sédimentaire artificiel.

Le coût des opérations prend en compte certaines dispositions issues de l'étude d'impact. En particulier des mesures ont été adoptées pour préserver les zones sensibles (herbiers de posidonie) :

- un maximum de particules fines et (ou) de vase sont éliminées sur la zone d'emprunt, lors des dragages, par un système de surverse des eaux en décantation dans le puits de la drague ;
- l'élargissement de la plage a été effectué par un dépôt à terre poussé par les engins de chantier au bord de la laisse de plage, plutôt que directement en mer. La répartition finale du sable sur les petits fonds est effectuée naturellement par les vagues.

Le coût total actualisé à octobre 2014 s'élève à 52,4 M€ pour 12 km de long soit un coût linéaire de 4 370 €/ml. Cette opération se décompose comme suit :

	Coût	Année	Indice TP02 à la date des travaux	Indice TP02 octobre 2014	Coût actualisé octobre 2014	Pourcentage du montant total
Études	2 200 000 €	2004	520,1	700,5	2 963 084 €	5,65%
MOE, AMO, SPS, suivi du trait de côte	3 200 000 €	2009	625,6	700,5	3 583 120 €	6,83%
Acquisitions foncières	2 800 000 €	2009	625,6	700,5	3 135 230 €	5,98%
Déplacement de la voie littorale	26 400 000 €	2008	629,5	700,5	29 377 601 €	56,02%
Bâtiments	1 500 000 €	2010	660,6	700,5	1 590 599 €	3,03%
Création cordon dunaire	2 700 000 €	2008	629,5	700,5	3 004 527 €	5,73%
Travaux terrestres divers (dont plantations)	1 655 000 €	2010	660,6	700,5	1 754 961 €	3,35%
Rechargement de sable	3 600 000 €	2014	701,8	700,5	3 593 331 €	6,85%
Écoplage	1 300 000 €	2011	680,9	700,5	1 337 421 €	2,55%
Ouvrages atténuateurs de houle	2 100 000 €	2012	698,8	700,5	2 105 109 €	4,01%
Total	47 455 000 €				52 444 985 €	100,00%

Les travaux de VRD et les acquisitions foncières correspondant à l'achat des emprises pour le déplacement de la route représentent 62 % du montant total.

Les prestations intellectuelles atteignent un pourcentage de 12,5 %, ce qui est normal sur ce type d'opération complexe.

La création du cordon dunaire et le rechargement de plage représentent un total de 12,6 % avec des parts sensiblement égales.

Le procédé Écoplage® et l'atténuateur de houle, réalisés sur un linéaire cumulé de 1 700 m, représentent 6,6 % du coût.

Si Écoplage® ou l'atténuateur de houle étaient déployés sur l'ensemble du linéaire, les coûts linéaires seraient respectivement de 6 000 €/ml et 6 200 €/ml, hors rechargement de plage pour l'atténuateur de houle. Ces dispositifs représenteraient alors de l'ordre du tiers de l'investissement.

4.2.2 Réhabilitation du lido de Petit Travers

L'opération de réhabilitation du lido de Petit Travers vise les objectifs généraux suivants :

- requalifier l'image du lido et améliorer les conditions de sa fréquentation ;
- contribuer à apporter une réponse durable à l'érosion marine.

Préalablement au réaménagement du site, un rechargement en sable de 382 000 m³ a été réalisé en 2008 sur un linéaire de 3 350 m, linéaire supérieur à celui concerné par le reste des travaux.

Le volet terrestre du projet est représenté dans ses grandes lignes en Illustration 20. Les principaux postes de dépense ont été consacrés aux travaux suivants :

- aménagement d'aires de stationnement et réorganisation des voies de circulation (2009) ;

- suppression de la circulation motorisée en arrière de plage, aménagement du stationnement, renaturation du site (2014-2015) :
 - suppression de la RD 59 et renaturation de son emprise (ensablement et végétalisation) ;
 - reconstitution et consolidation du cordon dunaire (équipement de ganivelles) et réhabilitation des dunes existantes (nettoyage, aide à la végétalisation, comblement des brèches) ;
- fréquentation canalisée par la mise en place de ganivelles le long de chaque aménagement (piste, piste cyclable, cheminements piétons) ;
- réhabilitation des prés salés, création d'une zone humide et élimination des plantes envahissantes.

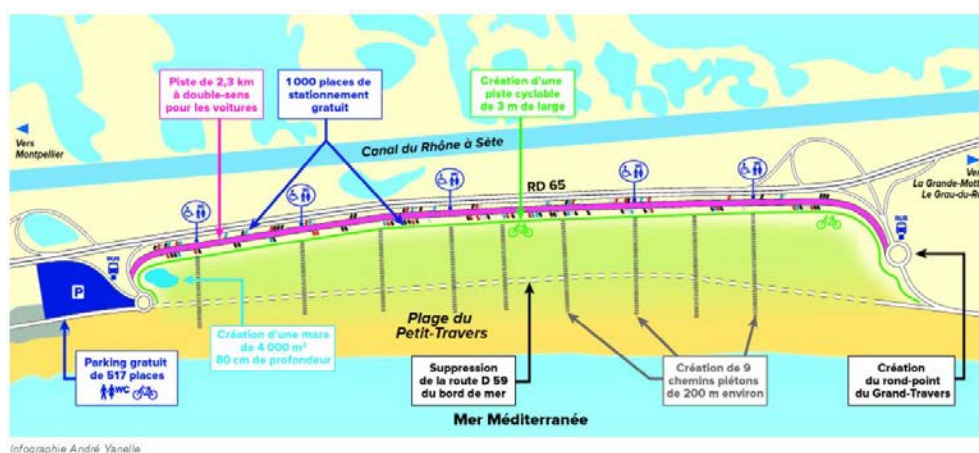


Illustration 20 : plan d'aménagement de Petit Travers
(source : la Gazette de Montpellier)

Le coût total actualisé à octobre 2014 s'élève à 17,3 M€ pour 2,4 km de long (en faisant abstraction du linéaire de 3,3 km du rechargement) soit un coût linéaire de 7,2 M€/km. Cette opération se décompose comme suit :

	Coût HT	année	indice TP02	indice TP02 octobre 2014	Coût HT octobre 2014	Pourcentage du montant total
Études préparatoires et suivi de réalisation	1 118 862 €	2008	624,7	700,5	1 254 622 €	7,24%
Acquisitions foncières et SAFER	0 €				0 €	0,00%
Aménagements d'aires de stationnement, ré-organisation des voies de circulation (2009)	7 900 000 €	2009	625,6	700,5	8 845 828 €	51,03%
Aménagement et renaturation du site (2014-2015)	4 400 000 €	2014-2015	701,7	700,5	4 392 475 €	25,34%
Rechargement de plage	2 533 399 €	2008 oct	624,7	700,5	2 840 797 €	16,39%
Total					17 333 723 €	100,00%

Dans cette opération, on constate que les sommes consacrées aux travaux strictement terrestres représentent 51 % du total. Les sommes dépensées sur la plage et pour la réhabilitation de la dune représentent 41,7 %. Le reste correspond aux prestations intellectuelles d'études et de suivi. Les coûts associés aux acquisitions foncières et aux taxes correspondantes n'ont pas été communiqués.

4.2.3 Reconstitution du cordon dunaire et de la plage de Vias

Avant travaux, le littoral de Vias (cf. Illustration 21) présentait une alternance de plages de sable et de zones de « cabanes et campings » bordées d'enrochements. Ces derniers ont provoqué par la réflexion des vagues une forte érosion à leur pied.



Illustration 21 : littoral de Vias avant travaux
(source DDTM 34)

Le projet consiste à rétablir sur la côte ouest de Vias un fonctionnement naturel par une extension de la largeur de la plage et la reconstitution d'un cordon dunaire (cf. Illustration 22).

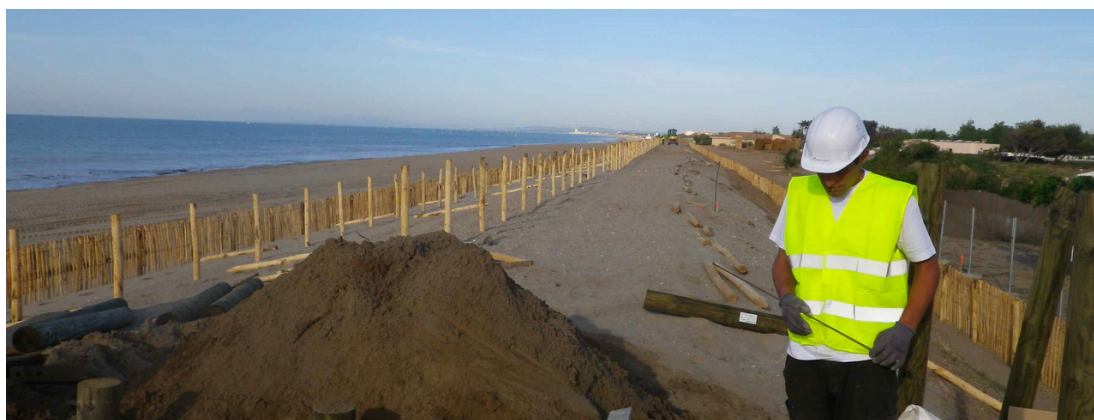


Illustration 22 : travaux de reconstitution du cordon dunaire et de la plage de Vias
(source DDTM 34)

Le projet global porte sur une longueur totale de 3,4 km mais l'opération est réalisée par tranche en fonction des acquisitions foncières et de la libération des emprises. Nous nous focalisons ici sur la première tranche d'une longueur de 860 m. Le coût observé au travers des marchés de travaux et de prestations intellectuelles est de 3,44 M€, soit 4 000 €/ml (à noter que les travaux sur les 3,4 km sont estimés à 13,6 M€, soit exactement le même coût linéaire de 4 000 €/ml). La distribution des dépenses correspondant à la première phase de travaux est la suivante :

	Coût HT	Année	Indice TP02 à la date des travaux	Indice TP02 octobre 2014	Coût actualisé octobre 2014	Pourcentage du montant total
Études préparatoires (AMO, MOE, topographie, évaluation environnementale, concertation)	289 246 €	2014	701,8	700,5	288 710 €	8,38%
Études en phase travaux (MOE, SPS, suivi du trait de côte)	418 990 €	2014	701,8	700,5	418 214 €	12,14%
Acquisitions foncières et SAFER	352 298 €	2014	701,8	700,5	351 645 €	10,21%
Libération des enjeux	385 000 €	2015	697,9	700,5	386 434 €	11,22%
Suppression des enrochements, façonnage et aménagement du cordon dunaire	628 000 €	2015	697,9	700,5	630 340 €	18,29%
Rechargement de plage	1 365 030 €	2015	697,9	700,5	1 370 115 €	39,77%
Total	3 438 563 €				3 445 458 €	100,00%

Le fort pourcentage associé aux études menées en phase de préparation et en phase travaux (20 %) s'explique par le fait qu'elles intègrent des prestations qui portent sur l'ensemble de la cellule sédimentaire Orb-Hérault. Les autres lignes sont par contre strictement liées aux 860 ml de la première tranche de travaux considérée.

Les acquisitions foncières et la libération des enjeux représentent une proportion des dépenses relativement limitée (21 %) car il s'agit surtout du retrait des « cabanes et campings » positionnés à même l'estran.

Le rechargement de plage représente une part équivalente (40 %) au montant cumulé des acquisitions foncières, de la libération des emprises et de la reconstitution du cordon dunaire.

Des mesures compensatoires sont par ailleurs engagées à hauteur de 132 000 € HT sur une durée de 25 ans.

4.3 COÛTS D'INVESTISSEMENT DES OPÉRATIONS DE GESTION DU TRAIT DE CÔTE SANS VOLET TERRESTRE

Comme les opérations précédentes, les opérations considérées dans la présente section sont des opérations globales de gestion du trait de côte mais leur périmètre n'intègre pas de volet terrestre. En considérant le trait de côte existant, les travaux consistent principalement en :

- l'apport de matériaux pour recharger la plage et le cordon dunaire ;
- l'implantation éventuelle de brise-lames (ou ouvrages atténuateurs de houle) en zone immergée dans le cas d'une plage à pente faible (dans le cas d'une plage à forte pente, c'est une butée de pied qui peut être positionnée en bas de plage pour retenir les sables).

4.3.1 Mise en valeur du lido de Frontignan

Les travaux entrepris par Thau Agglo sur le lido de Frontignan visent, sur une longueur de 7 km, à :

- réalimenter le lido de Frontignan en galets et en sable par des apports extérieurs au lido pour élargir et rehausser les plages mais aussi réengraisser les petits fonds ;
- conforter les ouvrages actuels afin de maintenir les sables et participer à la protection du littoral ;
- construire un cordon d'arrière-plage renforcé sur l'ensemble du lido.

Cette opération vise globalement à protéger le littoral des phénomènes d'érosion et de submersion marine (pour des tempêtes non exceptionnelles) [Artelia, 2013]. Elle comporte deux tranches dont l'illustration 23 présente la localisation.

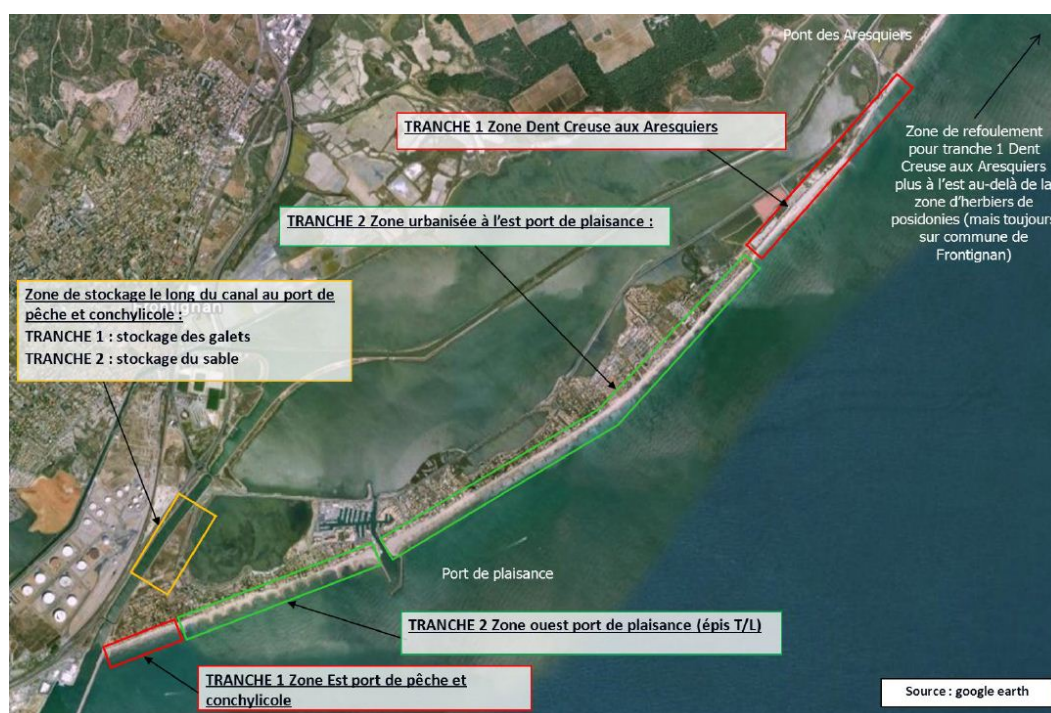


Illustration 23 : localisation des tranches de travaux sur le lido de Frontignan
(source : [Artelia, 2013])

Notre étude étant basée sur les coûts réels observés, nous nous intéressons ici à la première tranche de travaux, seule tranche réalisée (partiellement) à ce jour. Elle comporte :

- entre le port de pêche et le port de plaisance : la réfection des cinq épis à l'est immédiat du port de pêche ;
- entre Dent-Creuse et Aresquiers :
 - le rechargement en sable des plages sur 1,3 km ;
 - la création d'un cordon d'arrière-plage et d'un soubassement en galets au niveau des Aresquiers sur 740 m ;
 - des travaux divers sur les épis (trois constructions, une réfection, un allongement et un raccourcissement).

Le coût total actualisé à octobre 2014 s'élève à 6,6 M€ pour 2,2 km de long soit un coût linéaire de 3 000 €/ml.

(En complément de cette analyse sur les coûts observés, les projections sur l'ensemble de l'opération sont les suivantes : en avant-projet, le coût total des travaux est estimé à 13,5 M€ HT pour 7 km de long soit, après actualisation au mois d'octobre 2014, 2 500 €/ml.)

La décomposition des dépenses est la suivante :

	Coût	Année	Indice TP02 à la date des travaux	Indice TP02 octobre 2014	Coût actualisé octobre 2014	Pourcentage du montant total
Études	500 000 €	2013	702,1	700,5	498 861 €	7,60%
MOE, AMO, études réglementaires, SPS	710 000 €	2014	701,8	700,5	708 685 €	10,80%
Travaux sur les épis	520 000 €	2014	701,8	700,5	519 037 €	7,91%
Soubassement de galets	1 600 000 €	2015	702,5	700,5	1 595 445 €	24,31%
Cordon de galets	600 000 €	2015	702,5	700,5	598 292 €	9,12%
Rechargement de plage	2 650 000 €	2015	702,5	700,5	2 642 456 €	40,26%
Total	6 580 000 €				6 562 774 €	100,00%

L'essentiel des dépenses concerne les mouvements de sable et de galets (73,7 %), part très supérieure à celle consacrée aux épis (7,9 %).

Le montant élevé dédié aux études et au suivi (18,4 %) s'explique par le fait que les travaux n'ont été réalisés que sur un linéaire de 2,2 km sur un total de 7 km tandis que les études portent sur l'ensemble du linéaire. Ce pourcentage élevé montre aussi toute l'attention qui est portée au choix de solutions s'inscrivant dans une gestion durable du trait de côte et limitant l'impact sur l'environnement en phase de travaux.

4.3.2 Mise en valeur du littoral de Valras Vendres

L'étude [Cete Méditerranée, 2011] nous livre un descriptif de cette opération achevée en 2008.

Le littoral, entre les embouchures de l'Orb et de l'Aude s'étend sur 6 km environ sur les communes de Valras-Plage et de Vendres. Sur ce secteur, le littoral est soumis à une dérive

sédimentaire est-ouest à l'origine d'une érosion importante des plages de Valras et d'une accumulation de sable sur les plages de Vendres.

Depuis 1985, plusieurs ouvrages de protection de type brise-lames ont été réalisés de l'est vers l'ouest sur la commune de Valras. Toutefois, l'érosion restait marquée à l'extrémité ouest de la zone protégée.

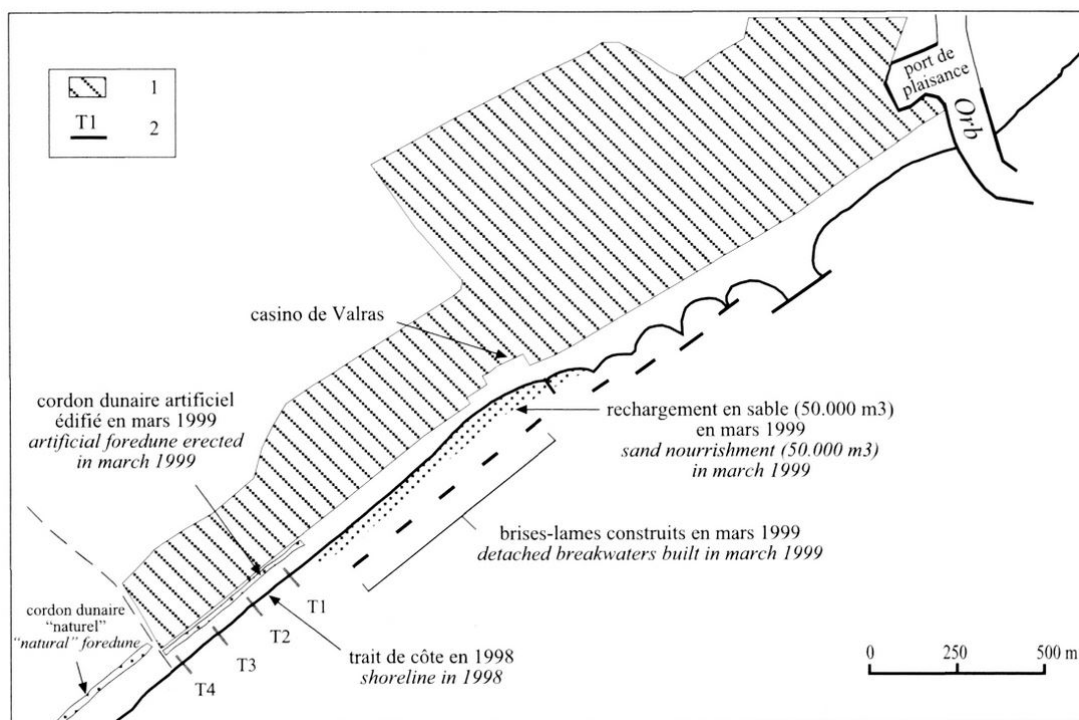


Illustration 24 : la plage de Valras en 1999 (légende : 1 – zone densément urbanisée, 2 – points de mesure)
(source : [Paul Durand, 2001])

Les communes de Valras-Plage et Vendres ont donc décidé de protéger la zone urbanisée à l'ouest de la zone déjà équipée en tentant d'éviter de repousser l'érosion sur le littoral naturel de Vendres. Entre temps, le cordon dunaire de cette zone urbanisée non protégée a été détruit lors des tempêtes de novembre et décembre 2003 et protégé de manière temporaire par un ouvrage longitudinal de haut de plage en enrochements.

L'opération, menée en 2007 et 2008 sur une longueur cumulée d'environ 1 050 m, a donc consisté :

- sur Valras-Plage, sur un linéaire de 450 m :
 - à réaliser trois brise-lames en enrochements de 65 ml en continuité des ouvrages existants pour protéger la zone urbanisée : 1,72 M€ ;
 - à démanteler l'ouvrage en enrochements de haut de plage installé lors des travaux d'urgence avec utilisation des matériaux pour la réalisation des brise-lames (travaux intégrés au prix précédent) ;
 - à reconstruire un cordon dunaire sableux de 450 ml en lieu et place de la digue en enrochements (8 000 m³ de sable) : 0,33 M€ ;
- sur Vendres, sur un linéaire de 600 m : à réaliser deux butées de pied de 300 ml, l'une en enrochements (0,87 M€), l'autre en géotextile (0,49 M€), soit un total de 1,36 M€.

Cette opération comporte par ailleurs un volet de rechargement sur Valras-Plage (45 000 m³) et sur Vendres (35 000 m³) pour un montant de 1,36 M€. Le sable nécessaire au rechargement a été dragué sur la zone d'accumulation à l'est de la digue de l'Orb par une dragueuse suceuse à godets et envoyé jusqu'au site grâce à 3,5 km de canalisation.

Le montant total actualisé à octobre 2014 est de 5,42 M€ pour 1,05 km de long soit un coût linéaire de 5 160 €/ml.

La décomposition de cette opération implique de distinguer entre les trois sections, suivant les techniques adoptées :

- Valras (450 m avec brise-lames) ;

	Coût	Année	Indice TP02 à la date des travaux	Indice TP02 octobre 2014	Coût actualisé octobre 2014	Pourcentage du montant total	coûts linéaires (€/km)
Études	NC				NC	0,00%	NC
Reconstitution cordon dunaire	330 000 €	2008	595,4	700,5	388 252 €	11,72%	862 781 €
Rechargement de plage	765 000 €	2008	595,4	700,5	900 038 €	27,18%	2 000 084 €
Démantèlement enrochements de haut de plage et construction de 3 brise-lames de 65 m	1 720 000 €	2008	595,4	700,5	2 023 614 €	61,10%	4 496 921 €
Total	2 815 000 €				3 311 904 €	100,00%	7 359 786 €

- Vendres première section (300 m avec butée de pied en enrochements),

	Coût	Année	Indice TP02 à la date des travaux	Indice TP02 octobre 2014	Coût actualisé octobre 2014	Pourcentage du montant total	coûts linéaires (€/km)
Études	NC				NC	0,00%	NC
Rechargement de plage	297 500 €	2008	595,4	700,5	350 015 €	25,48%	1 166 716 €
Réalisation butée de pied en enrochements	870 000 €	2008	595,4	700,5	1 023 572 €	74,52%	3 411 908 €
Total	1 167 500 €				1 373 587 €	100,00%	3 052 416 €

- Vendres deuxième section (300 m avec butée de pied en géotextile).

	Coût	Année	Indice TP02 à la date des travaux	Indice TP02 octobre 2014	Coût actualisé octobre 2014	Pourcentage du montant total	coûts linéaires (€/km)
Études	NC				NC	0,00%	NC
Rechargement de plage	297 500 €	2008	595,4	700,5	350 015 €	25,48%	1 166 716 €
Réalisation butée de pied en géotextile	490 000 €	2008	595,4	700,5	576 495 €	41,97%	1 921 649 €
Total	787 500 €				926 509 €	67,45%	2 058 910 €

4.3.3 Restauration de l'espace littoral à Villeneuve-lès-Maguelone

L'opération de Villeneuve-lès-Maguelone comprend principalement un rechargement de plage et une réhabilitation du cordon dunaire. Nous ne considérons ici qu'une première tranche de travaux sur un linéaire de 625 m.

Initialement, l'opération prévoyait un rechargement de la plage associé à un repositionnement des bassins aquacoles. Finalement les bassins ont été simplement comblés, ce qui a divisé par deux le montant de l'opération.

D'autres interventions relativement mineures ont été menées dans le cadre des marchés de travaux : déplacement d'un rond-point (103 k€), confortement des berges du grau du Prévost (12 k€), démantèlement d'une prise d'eau en mer (25 k€), fourniture et pose de mobilier en bois (16 k€). Ces opérations étant ponctuelles, elles ont été soustraites des analyses.

Dans ces conditions, le coût total actualisé à octobre 2014 s'élève à 930 k€ pour 0,625 km soit un coût linéaire de 1 488 €/ml.

La décomposition est la suivante (les coûts des prestations d'études et de suivi n'ont pas été communiqués) :

	Coût	Année	Indice TP02 à la date des travaux	Indice TP02 octobre 2014	Coût actualisé octobre 2014	Pourcentage du montant total
Études et suivi	NC				NC	
Réhabilitation cordon dunaire	558 872 €	2014	701,3	700,5	558 234 €	60,03%
Rechargement de plage	372 125 €	2014	701,3	700,5	371 701 €	39,97%
Total	930 997 €				929 935 €	100,00%

La part des dépenses consacrées à la réhabilitation du cordon dunaire est assez nettement supérieure à celle consacrée au rechargement.

4.3.4 Confortement du front de mer de Capbreton

Le contexte de l'opération est le suivant : l'embouchure du Boucarot est protégée par une digue qui a pour effet d'interrompre le transit longitudinal des sables (dérive littorale nord-sud) provoquant ainsi au nord une importante accrétion et au sud une forte érosion aggravée par les impacts des ouvrages de défense qui ont fixé le trait de côte au niveau de la station balnéaire. De plus, une barre sableuse dangereuse pour la navigation se formait à la sortie du Boucarot. Capbreton devait donc résoudre un double problème : désensabler le chenal du Boucarot et réensabler ses plages [Marie-Claire Prat et Christine Clus-Auby, 2006].

L'opération de Capbreton a consisté en la mise en place d'un système de transfert hydraulique (seul exemple en France) conjuguée à la restructuration des épis en enrochements. Des travaux ponctuels d'aménagement des cordons dunaires, dont le coût est relativement faible par rapport au reste de l'opération (77 296 € valeur juillet 2017), ont également été réalisés mais leur caractère discontinu ne permet pas de les intégrer dans cette étude.



Illustration 25 : prélèvement de sable au nord (1), passage de la conduite sous le chenal (2),
rejet et étalage au sud (3)
(auteurs : Ville de Capbreton et Virginie Chaouch)

La décomposition de l'opération est la suivante :

	Coût	Année	Indice TP02 à la date des travaux	Indice TP02 octobre 2014	Coût actualisé octobre 2014	Pourcentage du montant total	coûts linéaires (€/km)
Études	NC				NC	0,00%	NC
Système de transfert hydraulique (y compris bâtiment et engins de terrassement)	3 224 237 €	2007	585,5	700,5	3 857 520 €	78,46%	2 967 323,15 €
Restructuration des épis	885 000 €	2007	585,5	700,5	1 058 826 €	21,54%	814 481 €
Total	4 109 237 €				4 916 346 €	100,00%	3 781 805 €

Le total des dépenses consenties pour cette opération s'élève à 4,916 M€ HT (valeur octobre 2014). Rapporté au linéaire de côte traité (1,3 km), il en ressort un coût linéaire de 3 800 k€/km. Les dépenses d'investissement et d'exploitation du *by-pass* sont précisées en section 6.2.

4.4 COMPARAISON ET SYNTHÈSE DES COÛTS D'INVESTISSEMENT DES OPÉRATIONS DE GESTION DU TRAIT DE CÔTE

Sur la base des résultats obtenus dans les deux sections précédentes, un comparatif et une synthèse peuvent être établis. Pour des raisons de clarté, dans un premier temps nous récapitulerons les coûts d'investissement des opérations et, dans un second temps, nous établirons une comparaison et une synthèse sur la base de leurs coûts linéaires.

4.4.1 Récapitulatif des coûts d'investissement

Les coûts résultant des analyses détaillées peuvent être présentés :

- en considérant l'ensemble des dépenses, à savoir : les prestations intellectuelles, les dépenses sur le volet terrestre et les dépenses sur le volet maritime (relatives aux travaux sur la dune et sur l'estran) ;
- en détaillant les dépenses « maritimes » (relatives à la dune et à l'estran).

À noter que dans les deux cas :

- l'opération de restauration du lido de Sète fera l'objet d'une attention particulière pour tirer tout le bénéfice des dispositions expérimentales qui ont été adoptées. Ainsi, les différentes options mettant en œuvre le rechargement seul ou accompagné d'un dispositif d'atténuation des houles ou d'Écoplage® feront l'objet de lignes distinctes ;
- l'opération de Valras-Vendres fera l'objet de trois lignes distinctes :
 - Valras (450 m avec brise-lames) ;
 - Vendres première section (300 m avec butée de pied en enrochements) ;
 - Vendres deuxième section (300 m avec butée de pied en géotextile).

4.4.1.1 Dépenses totales d'investissement

	Linéaire (km)	Prestations intellectuelles (études et suivi)	Acquisitions foncières, travaux terrestres	Travaux sur cordon dunaire et estran	Total
Avec volet terrestre					
Lido de Sète (rechargement sur 12 km, Ecoplage sur 0,7 km et un atténuateur de houle sur 1 km)	12	6 546 204 €	34 103 431 €	11 795 350 €	52 444 985 €
		12%	65%	22%	100%
Lido de Sète sans atténuateur de houle ni Ecoplage	12	6 546 204 €	34 103 431 €	8 352 820 €	49 002 455 €
		13%	70%	17%	100%
Lido de Sète avec atténuateur de houle sur 12 km (sans Ecoplage)	12	6 546 204 €	34 103 431 €	33 614 125 €	74 263 760 €
		9%	46%	45%	100%
Lido de Sète avec Ecoplage sur 12 km (sans atténuateur de houle)	12	6 546 204 €	34 103 431 €	31 280 038 €	71 929 674 €
		9%	47%	43%	100%
Petit Travers (rechargement sur 3,35 km)	2,4	1 254 622 €	8 845 828 €	7 233 273 €	17 333 723 €
		7%	51%	42%	100%
Vias Ouest (La réhabilitation du cordon dunaire comprend le retrait des enrochements.)	0,86	706 924 €	738 079 €	2 000 455 €	3 445 458 €
		21%	21%	58%	100%
Sans volet terrestre					
Frontignan (soubassement et cordon de galets, rechargement de plage et épis)	2,2	1 207 545 €	0 €	5 355 229 €	6 562 774 €
		18,40%	0,00%	81,60%	100,00%
Valras Plage (Retrait enrochements haut de plage et construction de 3 brise-lames de 65 m)	0,45	NC	0 €	3 311 904 €	3 311 904 €
		NC	0,00%	100,00%	100,00%
Vendres (avec butée de pied en enrochements)	0,3	NC	0 €	1 373 587 €	1 373 587 €
		NC	0,00%	100,00%	100,00%
Vendres (avec butée de pied en géotextile)	0,3	NC	0 €	926 509 €	926 509 €
		NC	0,00%	100,00%	100,00%
Villeneuve-lès-Maguelone (rechargement sur 625 m, réhabilitation cordon dunaire sur linéaire supérieur)	0,625	NC	0 €	929 935 €	929 935 €
		NC	0,00%	100,00%	100,00%
Capbreton (système de transfert hydraulique et restructuration des épis)	1,3	NC	0 €	4 916 346 €	4 916 346 €
		NC	0,00%	100,00%	100,00%

Quelques conclusions peuvent être tirées de ce tableau comparatif :

Lorsqu'une opération vise la réhabilitation globale de la frange littorale en intégrant un volet terrestre, celui-ci représente la plus grosse partie des dépenses : 51 % dans le cas de Petit Travers, 65 % dans le cas du lido de Sète (dans ce dernier cas, la réalisation d'un atténuateur de houle ou la mise en place de drains de plage Écoplage® sur l'ensemble

du linéaire ramènerait le pourcentage respectivement à 46 et 47 %). Sur Vias Ouest, le pourcentage de 21 % dédié au « volet terrestre » s'explique par le fait qu'il s'agit d'un cas assez particulier de libération d'un estran occupé par des cabanes et des campings, d'où des acquisitions foncières et des travaux d'aménagement limités.

Pour les opérations qui sont achevées, donc en écartant les opérations de Vias ouest et de Frontignan dont seule la première tranche a pu être prise en compte, le pourcentage des dépenses dédiées aux études et au suivi est compris entre 7 et 13 % (ces pourcentages se situent au milieu de la plage de valeurs obtenues dans le volet fluvial de l'étude : les pourcentages étaient compris entre 5 % et 15 %).

4.4.1.2 Dépenses « maritimes » d'investissement

Le tableau des dépenses « maritimes » d'investissement présenté ci-après nous permet de mieux apprécier la **répartition des dépenses entre « travaux sur le cordon dunaire » et « rechargement de plage »**. La répartition apparaît être sensiblement différente selon que l'on considère les opérations avec ou sans volet terrestre :

- sur les opérations comportant un volet terrestre, la part des dépenses consacrées à la restauration des dunes est plus importante que celle consacrée au rechargement de plage (dans un rapport de 6/10 à 4/10), ce qui atteste de travaux réalisés « plus en profondeur » sur le cordon dunaire pour sa réhabilitation ;
- inversement, sur les travaux sans volet terrestre, la part des dépenses consacrées au rechargement de plage est nettement supérieure à celle consacrée à la restauration dunaire : le rapport est au moins de 7/10 contre 3/10, et dans le cas de Vendres et de Capbreton, les dépenses consacrées au cordon dunaire peuvent même être considérées comme négligeables.

Le cas de Vias Ouest est particulier puisque le « volet terrestre » correspond en réalité à la libération d'enjeux situés sur l'estran. Vias Ouest doit donc dans cette analyse être rangée dans les opérations « sans volet terrestre ». L'absence de données sur le linéaire de cordon dunaire traité à Villeneuve-lès-Maguelone (si ce n'est qu'il est nettement supérieur à celui du rechargement de plage) conduit à faire abstraction de cette ligne dans l'analyse.

Le tableau des dépenses « maritimes » d'investissement permet également d'apprécier la **répartition des dépenses entre « les ouvrages de génie civil » et « les travaux dunaires et les rechargements de plage »**. Dès lors que des ouvrages (brise-lames, butées de pied) sont positionnés en bas d'estran, la part des dépenses qui leur est consacrée dans le volet maritime (donc en faisant abstraction du volet terrestre) est prépondérante : entre 60 et 75 %. Dans le cas du système de transfert hydraulique de Capbreton, le pourcentage est encore supérieur : 78 %.

La restructuration des épis n'occupe qu'une part limitée des dépenses. Ce type de travaux n'apparaît que sur deux opérations et avec des pourcentages de l'ordre de 10 ou 20 %. La réutilisation sur place ou sur d'autres sites des matériaux constituant les ouvrages existants peut contribuer à limiter les dépenses sur ce poste.

	Linéaire (km)	Travaux sur le cordon dunaire	Travaux de restructuration d'épis	Rechargement de plage	Brise-lames, butées de pied, Ecoplage et transfert hydraulique	Total
Avec volet terrestre						
Lido de Sète (rechargement sur 12 km, Ecoplage sur 0,7 km et un atténuateur de houle sur 1 km)	12	4 759 489 €	0 €	3 593 331 €	3 442 530 €	11 795 350 €
		40%	0%	30%	29%	100%
Lido de Sète sans atténuateur de houle ni Ecoplage	12	4 759 489 €	0 €	3 593 331 €	0 €	8 352 820 €
		57%	0%	43%	0%	100%
Lido de Sète avec atténuateur de houle sur 12 km (sans Ecoplage)	12	4 759 489 €	0 €	3 593 331 €	25 261 305 €	33 614 125 €
		14%	0%	11%	75%	100%
Lido de Sète avec Ecoplage sur 12 km (sans atténuateur de houle)	12	4 759 489 €	0 €	3 593 331 €	22 927 218 €	31 280 050 €
		15%	0%	11%	73%	100%
Petit Travers (rechargement sur 3,35 km)	2,4	4 392 475 €	0 €	2 840 797 €	0 €	7 233 273 €
		61%	0%	39%	0%	100%
Vias Ouest (La réhabilitation du cordon dunaire comprend le retrait des enrochements.)	0,86	630 340 €	0 €	1 370 115 €	0 €	2 000 455 €
		32%	0%	68%	0%	100%
Sans volet terrestre						
Frontignan (soubassement et cordon de galets, rechargement de plage et épis)	2,2	598 292 €	519 037 €	4 237 900 €	0 €	5 355 229 €
		11,17%	9,69%	79,14%	0,00%	100,00%
Valras Plage (Retrait enrochements haut de plage et construction de 3 brise-lames de 65 m)	0,45	388 252 €	€	900 038 €	2 023 614 €	3 311 904 €
		11,72%	0,00%	27,18%	61,10%	100,00%
Vendres (avec butée de pied en enrochements)	0,3	0 €	0 €	350 015 €	1 023 572 €	1 373 587 €
		0,00%	0,00%	25,48%	74,52%	100,00%
Vendres (avec butée de pied en géotextile)	0,3	0 €	0 €	350 015 €	576 495 €	926 509 €
		0,00%	0,00%	37,78%	62,22%	100,00%
Villeneuve-lès-Maguelone (rechargement sur 625 m, réhabilitation cordon dunaire sur linéaire supérieur)	0,625	558 234 €	0 €	371 701 €	0 €	929 936 €
		60,03%	0,00%	39,97%	0,00%	100,00%
Capbreton (système de transfert hydraulique et restructuration des épis)	1,3	0 €	1 058 826 €	0 €	3 857 520 €	4 916 346 €
		0,00%	21,54%	0,00%	78,46%	100,00%

4.4.2 Comparaison et synthèse des coûts linéaires

Sur la base des deux tableaux précédemment établis, les dépenses linéaires d'investissement peuvent être calculées pour l'ensemble des dépenses et pour les dépenses « maritimes ».

4.4.2.1 Dépenses linéaires totales d'investissement

Le calcul donne les dépenses linéaires d'investissement suivantes :

	Linéaire (km)	Prestations intellectuelles (études et suivi) - €/km	Acquisitions foncières, travaux terrestres - €/km	Travaux sur cordon dunaire et estran - €/km	Total - €/km
Avec volet terrestre					
Lido de Sète (rechargement sur 12 km, Ecoplage sur 0,7 km et un atténuateur de houle sur 1 km)	12	545 517 €	2 841 953 €	982 946 €	4 370 415 €
		12%	65%	22%	100%
Lido de Sète sans atténuateur de houle ni Ecoplage	12	545 517 €	2 841 953 €	696 068 €	4 083 538 €
		13%	70%	17%	100%
Lido de Sète avec atténuateur de houle sur 12 km (sans Ecoplage)	12	545 517 €	2 841 953 €	2 801 177 €	6 188 647 €
		9%	46%	45%	100%
Lido de Sète avec Ecoplage sur 12 km (sans atténuateur de houle)	12	545 517 €	2 841 953 €	2 606 670 €	5 994 139 €
		9%	47%	43%	100%
Petit Travers (rechargement sur 3,35 km)	2,4	522 759 €	3 685 762 €	3 013 864 €	7 222 385 €
		7%	51%	42%	100%
Vias Ouest (La réhabilitation du cordon dunaire comprend le retrait des enrochements.)	0,86	822 004 €	858 232 €	2 326 110 €	4 006 347 €
		21%	21%	58%	100%
Sans volet terrestre					
Frontignan (soubassement et cordon de galets, rechargement de plage et épis)	2,2	548 884 €	0 €	2 434 195 €	2 983 079 €
		18,40%	0,00%	81,60%	100,00%
Valras Plage (Retrait enrochements haut de plage et construction de 3 brise-lames de 65 m)	0,45	NC	0 €	7 359 786 €	7 359 786 €
		NC	0,00%	100,00%	100,00%
Vendres (avec butée de pied en enrochements)	0,3	NC	0 €	4 578 624 €	4 578 624 €
		NC	0,00%	100,00%	100,00%
Vendres (avec butée de pied en géotextile)	0,3	NC	0 €	3 088 365 €	3 088 365 €
		NC	0,00%	100,00%	100,00%
Villeneuve-lès-Maguelone (rechargement sur 625 m, réhabilitation cordon dunaire sur linéaire supérieur)	0,625	NC	0 €	1 487 896 €	1 487 896 €
		NC	0,00%	100,00%	100,00%
Capbreton (système de transfert hydraulique et restructuration des épis)	1,3	NC	0 €	3 781 805 €	3 781 805 €
		NC	0,00%	100,00%	100,00%

Une analyse des valeurs apparaissant dans les différentes colonnes nous permet de faire ressortir les dépenses minimum, moyennes et maximum suivantes (pour les « acquisitions foncières, travaux terrestres et bâtiments », le tableau ne considère que les opérations avec volet terrestre, sans quoi le coût minimum serait nul) :

	Coût minimum par km	Coût moyen par km	Coût maximum par km
Prestations intellectuelles (études et suivi) - €/km	520 000 €	540 000 €	550 000 €
Acquisitions foncières, travaux terrestres et bâtiments - €/km	2 800 000 €	3 300 000 €	3 700 000 €
Travaux sur cordon dunaire et estran - €/km	700 000 €	3 100 000 €	7 400 000 €
Total - €/km	1 500 000 €	4 600 000 €	8 000 000 €

Les opérations de gestion du trait de côte présentent des coûts linéaires totaux classiquement compris entre 3 et 6 M€/km. Néanmoins, il peut apparaître un rapport de un à cinq entre des opérations « simples » de rechargement et restauration du cordon dunaire tels que réalisés à Villeneuve-lès-Maguelone pour un coût linéaire de 1,5 M€/km et des opérations dont l'ampleur est supérieure par :

- un volet terrestre important : Petit Travers présente un coût linéaire de 7,2 M€/km dont plus de la moitié est consacrée au volet terrestre ;
- un volet maritime comportant l'installation de brise-lames : Valras-Plage présente un coût linéaire de 7,4 M€/km.

Dans le détail, l'analyse par type de dépense permet de conclure que :

- pour les prestations d'études et de suivi à un coût linéaire relativement stable, de l'ordre de 0,5 M€/km (chiffre obtenu en ne considérant que les opérations dont toutes les tranches sont achevées) ;
- les dépenses linéaires d'acquisitions foncières et de travaux terrestres sont très élevées sur les opérations comportant un volet terrestre : entre 2,8 et 3,7 M€/km (en excluant le cas particulier de Vias Ouest dont les travaux de libération des « enjeux terrestres » s'effectuent en réalité principalement sur l'estran) ;
- les dépenses linéaires sur l'espace « maritime » peuvent être très variables :
 - pour un simple rechargement, la dépense sera de l'ordre de 0,7 M€/km ;
 - dans le cas d'une réhabilitation « en profondeur » du cordon dunaire (cas de Petit Travers) ou d'un rechargement massif en sable (cas de Frontignan ou de Vias), les dépenses linéaires sont de l'ordre de 2,4 M€ ;
 - lorsque les travaux comprennent en outre la pose d'un dispositif de drainage Écoplage®, d'un brise-lames en géotubes ou d'une butée de pied en géotextile, les dépenses linéaires s'élèvent respectivement à 2,6 M€, 2,8 M€ (dispositifs expérimentés sur Sète) et 3,1 M€ (cas de Vendres) ;
- dès lors que des enrochements sont utilisés en butée de pied ou en brise-lames, les coûts s'accroissent encore : respectivement 4,6 M€ sur Vendres et 7,4 M€ sur Valras-Plage. Par rapport à ces valeurs, l'opération de transfert hydraulique de Capbreton présente des dépenses inférieures (3,8 M€/km).

4.4.2.2 Dépenses linéaires « maritimes » d'investissement

Sur les dunes et les estrans, les dépenses linéaires d'investissement sont présentées dans le tableau suivant :

	Linéaire (km)	Travaux sur le cordon dunaire - €/km	Travaux de restructuration d'épis - €/km	Rechargement de plage - €/km	Brise-lames, butées de pied, Ecoplage et transfert hydraulique - €/km	Total - €/km
Avec volet terrestre						
Lido de Sète (rechargement sur 12 km, Ecoplage sur 0,7 km et un atténuateur de houle sur 1 km)	12	396 624 €	0 €	299 444 €	286 877 €	982 946 €
		40%	0%	30%	29%	100%
Lido de Sète sans atténuateur de houle ni Ecoplage	12	396 624 €	0 €	299 444 €	0 €	696 068 €
		57%	0%	43%	0%	100%
Lido de Sète avec atténuateur de houle sur 12 km (sans Ecoplage)	12	396 624 €	0 €	299 444 €	2 105 109 €	2 801 177 €
		14%	0%	11%	75%	100%
Lido de Sète avec Ecoplage sur 12 km (sans atténuateur de houle)	12	396 624 €	0 €	299 444 €	1 910 602 €	2 606 670 €
		15%	0%	11%	73%	100%
Petit Travers (rechargement sur 3,35 km)	2,4	1 830 198 €	0 €	1 183 665 €	0 €	3 013 864 €
		61%	0%	39%	0%	100%
Vias Ouest (La réhabilitation du cordon dunaire comprend le retrait des enrochements)	0,86	732 953 €	0 €	1 593 157 €	0 €	2 326 110 €
		32%	0%	68%	0%	100%
Sans volet terrestre						
Frontignan (soubassement et cordon de galets, rechargement de plage et épis)	2,2	271 951 €	235 926 €	1 926 318 €	0 €	2 434 195 €
		11,17%	9,69%	79,14%	0,00%	100,00%
Valras Plage (Retrait enrochements haut de plage et construction de 3 brise-lames de 65 m)	0,45	862 781 €	0 €	2 000 084 €	4 496 921 €	7 359 786 €
		11,72%	0,00%	27,18%	61,10%	100,00%
Vendres (avec butée de pied en enrochements)	0,3	0 €	0 €	1 166 716 €	3 411 908 €	4 578 624 €
		0,00%	0,00%	25,48%	74,52%	100,00%
Vendres (avec butée de pied en géotextile)	0,3	0 €	0 €	1 166 716 €	1 921 649 €	3 088 365 €
		0,00%	0,00%	37,78%	62,22%	100,00%
Villeneuve-lès-Maguelone (rechargement sur 625 m, réhabilitation cordon dunaire sur linéaire supérieur)	0,625	893 175 €	0 €	594 721 €	0 €	1 487 896 €
		60,03%	0,00%	39,97%	0,00%	100,00%
Capbreton (système de transfert hydraulique et restructuration des épis)	1,3	0 €	814 481 €	0 €	2 967 323 €	3 781 805 €
		0,00%	21,54%	0,00%	78,46%	100,00%

Ce tableau permet de faire apparaître les coûts linéaires associés aux différentes techniques utilisées :

	Coût minimum par km	Coût moyen par km	Coût maximum par km
Travaux sur le cordon dunaire	270 000 €	830 000 €	1 800 000 €
Travaux de restructuration d'épis	200 000 €	500 000 €	800 000 €
Rechargement de plage	300 000 €	1 200 000 €	2 000 000 €
Brise-lames, butées de pied, Ecoplage et transfert hydraulique	1 900 000 €	2 800 000 €	4 500 000 €

Sur ces différents types d'intervention, les disparités sur les coûts linéaires demeurent relativement importantes ; un constat qui s'explique principalement par des situations initiales (niveau de l'estran, état du cordon dunaire) très inégales et des projets aux ambitions variées.

Malgré cette disparité, il est utile d'établir des valeurs caractéristiques pour les **projets les plus courants** : projet sans volet terrestre visant l'adaptation du trait de côte par une intervention lourde de réhabilitation d'un cordon dunaire, de rechargement de la plage et d'une restructuration des épis. En considérant les trois premières lignes du tableau et en excluant la quatrième, relative aux brise-lames et autres dispositifs particuliers, le coût linéaire peut être caractérisé par :

- une valeur basse à 1 M€/km ;
- une valeur moyenne à 2,5 M€/km ;
- une valeur haute de 5 M€/km.

Les valeurs basse et moyenne sont confirmées par les coûts observés sur les opérations de gestion du trait de côte réalisées dans le cadre des programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI) en accompagnement de la révision des systèmes d'endiguement (cf. section 5.5).

Concernant les **projets moins courants mettant en œuvre des dispositifs particuliers**, pour éviter dans notre analyse l'écueil de comparer des situations trop distinctes, concentrons-nous sur les opérations de Sète et de Valras-Vendres où, dans les deux cas, des techniques différentes ont été expérimentées sur des sites présentant une certaine régularité.

Dans le cas de Sète, l'installation d'un Écoplage® ou d'un atténuateur de houle conduit à des coûts sensiblement équivalents entre 1,9 et 2,1 M€/km.

Dans le cas de Valras-Vendres, une hiérarchie plus nette apparaît entre les trois solutions :

- butée de pied en géotextile : 1,9 M€/km ;
- butée de pied en enrochements : 3,4 M€/km ;
- brise-lames en enrochements : 4,5 M€/km.

Ces coûts linéaires donnés pour les dispositifs particuliers doivent le cas échéant être additionnés aux coûts linéaires donnés pour les situations classiques.

Pour effectuer des estimations détaillées sur les rechargements de plage, la restauration des cordons dunaires et les ouvrages de génie civil, le lecteur est invité à consulter en complément les sections correspondantes qui apporteront des estimations sur les coûts volumiques ou massiques, informations indispensables pour affiner les estimations.

5. Coûts observés sur les opérations globales de protection contre les submersions marines

Les dispositifs de protection contre les submersions marines font l'objet de politiques publiques et de contraintes réglementaires particulières. Au cours des dernières années, l'évolution de la réglementation sur les ouvrages de protection contre les inondations et les effets désastreux de la tempête Xynthia ont fortement modifié les conditions d'intervention sur les digues côtières et ont donc eu une influence sensible sur les coûts. Nous étudierons donc dans un premier temps ce contexte. Grâce aux travaux de la commission mixte inondation en charge du suivi des plans d'actions de prévention des inondations, un éclairage global sur les dépenses (associées à des mesures structurelles et non structurelles) peut être apporté à l'échelle nationale.

Concernant les mesures structurelles, les dépenses consacrées aux digues ne prennent leur sens que dans un dispositif cohérent qui intègre non seulement des interventions sur ces ouvrages mais aussi d'autres types d'intervention (objet d'autres parties dans le présent document) : ré-ensablement, interventions sur les dunes, sur des ouvrages de génie civil ou hydrauliques... En analysant les mesures structurelles engagées sur cinq sites emblématiques, nous préciserons la part que peuvent représenter les digues et les autres types d'intervention dans le coût global de ces opérations. Nous déterminerons également :

- les coûts linéaires d'investissement globaux ;
- les coûts linéaires associés à chacune de ces mesures.

Dans les deux cas, les coûts linéaires sont déterminés en relation avec le linéaire de côte protégée (et non le linéaire d'ouvrage comme ce sera le cas en partie 8).

5.1 DES ÉVOLUTIONS RÉCENTES INFLUENÇANT LES COÛTS

Deux éléments de contexte récents influencent fortement les interventions sur les digues : les évolutions réglementaires et la mise en œuvre des programmes d'action de prévention des inondations. Ce contexte influence non seulement le coût des interventions sur des ouvrages particuliers mais aussi la structuration des dépenses sur les projets globaux de protection.

5.1.1 Les évolutions réglementaires

Le décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 a marqué un tournant dans le domaine de la sécurité des ouvrages hydrauliques. Depuis cette date, la réglementation impose aux gestionnaires de nouvelles obligations sur l'entretien, l'exploitation et la sécurité des ouvrages. Ces évolutions réglementaires favorisent la construction d'ouvrages plus solides permettant de disposer d'une marge de précaution accrue sur les niveaux de performance, ce qui a bien sûr un impact sur les coûts. Par ailleurs, l'intervention des bureaux d'études agréés pour certaines activités essentielles (notamment la conception des ouvrages et la conduite de travaux importants, les études de dangers et les revues de sûreté) entraîne également une augmentation des dépenses. Pour nos analyses, nous considérerons donc principalement les opérations postérieures à 2007.

5.1.2 Xynthia : une tempête qui change la donne

Les dépenses sur les systèmes d'endiguement côtiers ont très fortement évolué après la tempête Xynthia qui a affecté une grande partie du littoral atlantique le 28 février 2010. Les travaux s'inscrivent désormais très majoritairement dans le cadre de stratégies de protection repensées à l'échelle du système d'endiguement. L'étude des marchés de travaux sur le littoral français atteste du changement radical de posture apparu à la suite de Xynthia :

- avant Xynthia, seules sont recensées quelques rares opérations de réparation ou de confortement dont le coût linéaire est relativement faible (inférieur à 250 €/ml et souvent même inférieur à 100 €/ml) ;
- dans les six mois qui ont suivi Xynthia, de nombreuses interventions d'urgence ont été menées, notamment en Charente-Maritime, en Vendée et en Pays de la Loire. Ces travaux visaient principalement à rétablir le niveau de protection existant avant la tempête. Leur coût linéaire reste du même ordre de grandeur que précédemment ;
- sur la période 2010-2017, de nombreuses opérations ont été lancées, souvent dans le cadre de programmes d'action de prévention des inondations (PAPI) ou dans le cadre du plan submersions rapides (PSR). Ces opérations font l'objet d'une réflexion approfondie et visent en général à rehausser les ouvrages en plus de les conforter. Le coût linéaire de ces interventions a sensiblement augmenté, dépassant dans la plupart des cas 1 000 €/ml.

Avant d'aborder les programmes d'actions globaux engagés sur la période 2010-2017, il est intéressant de donner un aperçu des dépenses consenties pour les interventions d'urgence dans les six mois qui ont suivi Xynthia. Au préalable, il convient de souligner l'importance des dégâts que peut générer une tempête sur les ouvrages côtiers par rapport à une crue sur les digues d'un fleuve : si une brèche dans le domaine fluvial provoque une baisse du niveau dans le lit du fleuve et soulage les autres sections de digue, ce n'est pas le cas en général dans le domaine côtier (sauf cas de baies peu profondes – exemple de la baie de l'Aiguillon – où ce mécanisme apparaît de façon plus ou moins marquée). Dans le domaine côtier, l'interruption des phénomènes d'érosion liés à la surverse n'est obtenue que par le rééquilibrage des niveaux à l'intérieur et à l'extérieur du système d'endiguement. Les phénomènes d'érosion peuvent donc se poursuivre sur plusieurs cycles de marée sur de très longs linéaires de façon assez homogène. L'action des vagues ajoute par rapport au domaine fluvial une composante supplémentaire à l'aléa.

Analyse globale des dépenses en intervention d'urgence sur le linéaire touché par Xynthia

Dans le cas de la tempête Xynthia, le bilan des interventions a été établi par la DGPR comme suit. Nous exploitons ces chiffres pour apprécier le coût linéaire d'intervention à l'échelle de la façade maritime concernée.

Bilan des interventions – Source : Medde/DGPR

Au lendemain de la tempête Xynthia, l'urgence a consisté à intervenir sur les ouvrages protégeant directement des vies humaines, des secteurs d'activités économiques ou des voies de communication stratégiques, en prévision des marées à forts coefficients de fin mars 2010. Ces travaux ont été conduits par le biais de réquisitions préfectorales faisant intervenir près d'une cinquantaine d'entreprises mais aussi les moyens militaires (génie). Ils ont concerné :

- en Charente-Maritime, près de 120 kilomètres d'ouvrages endommagés voire détruits, soit de l'ordre de 50 % des ouvrages côtiers (220 km) ;
- en Vendée, 80 km de digues de premier rang ont été détruites par submersion ou érosion marine, soit 75 % du linéaire des ouvrages côtiers de ce département (112 km). De plus, 83 kilomètres de cordons dunaires ont été endommagés, un quart d'entre eux ont subi un recul supérieur à 10 m.

Dans ces deux départements, près de 190 chantiers ont été réalisés (120 chantiers en Charente-Maritime et 70 en Vendée) pour un montant de travaux de 31,9 M€ dont 15,5 M€ financés par l'État.

Coût linéaire des travaux d'urgence

En considérant que les 31,9 M€ de dépenses ont principalement été affectés aux 200 km de digues et autres ouvrages de défense contre la mer, le coût linéaire de la réparation est de 160 k€/km.

5.2 DÉPENSES OBSERVÉES À L'ÉCHELLE NATIONALE SUR LES PROGRAMMES D' ACTIONS GLOBAUX

Afin de ne pas donner une représentation tronquée des dépenses consacrées aux systèmes d'endiguement, il est indispensable de cerner plus globalement les dépenses d'investissement consacrées à la prévention des inondations et plus particulièrement au risque de submersion marine.

Depuis 2011, la commission mixte inondation (CMI) procède à l'examen et à la labellisation des programmes d'actions et de prévention des inondations (PAPI) et projets d'endiguements (dits PSR, plans submersion rapide) portés par les collectivités et dont le montant est supérieur à 3 M€. Les projets d'un montant inférieur à 3 M€ sont examinés par les instances locales de labellisation.

À l'échelle nationale, les travaux de la CMI nous renseignent sur les dépenses consacrées aux programmes d'actions de prévention du risque inondation, en distinguant notamment ce qui relève de mesures structurelles et non structurelles.

Nous présentons dans le tableau ci-après quelques chiffres clés issus du troisième bilan d'activité de la CMI et des instances de bassin de juillet 2011 à juillet 2015 [Medde, février 2016]. Dans ce tableau les lignes de dépenses correspondent aux sept thématiques qui structurent les PAPI (s'ajoute une ligne supplémentaire correspondant à l'animation des programmes).

Axe	Intitulé axe	Montant
	Animation	22 181 367,72 €
I	Amélioration de la connaissance et de la conscience du risque	29 808 000,4 €
II	Surveillance, prévision des crues et des inondations	12 768 148 €
III	Alerte et gestion de crise	6 262 642 €
IV	Prise en compte du risque inondation dans l'urbanisme	15 698 340 €
V	Actions de réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens	95 980 051,28 €
VI	Ralentissement des écoulements	310 605 005,85 €
VII	Gestion des ouvrages de protection hydraulique	618 008 371,45 €
	Total mesures non-structurelles	182 698 549,4 €
	Total mesures structurelles	928 613 377,3 €
	TOTAL PAPI COMPLETS et petits PAPI	1 111 311 926,7 €

Parmi les sept lignes thématiques, les cinq premières concernent les mesures non structurelles et les deux dernières des mesures structurelles. À mi-2015, il apparaît qu'au plan national, secteurs maritime et fluvial confondus, les mesures structurelles représentent 83,5 % des dépenses. Parmi les 49 projets retenus et labellisés, 13 PAPI et 3 PSR (digues) concernent les départements de Charente-Maritime et de Vendée, les plus touchés par la tempête Xynthia.

L'exemple de l'étier du Pouliguen (44) donne un aperçu du montage financier de ce type de programme qui fait intervenir de nombreux partenaires.

Axes du PAPI	Nombre d'actions	Maîtres d'ouvrage publics	Nombre de maîtres d'ouvrage	Coût (en € HT)
Connaissance et conscience du risque	8	État-Communes-Cap Atlantique	14	70 000
Surveillance et prévision	2	État-SIVU du Port-Cap Atlantique	3	18 000
Gestion de crise	3	État-Communes-Département 44	14	0
Urbanisme	7	État-Communes-Cap Atlantique	14	0
Réduction de vulnérabilité	3	Diagnostic : Cap Atlantique (Travaux : propriétaires des biens)	1	450 000
Écoulements fluviaux	Hors PAPI			/
Ouvrage hydraulique-Etier du Pouliguen	1	SIVU du Port de Pêche et Plaisance	1	7 400 000
Ouvrage hydraulique-Marais salants	9	Syndicat mixte pour la protection des marais salants à partir de 2014. ASA et Cap Atlantique en 2013.	1 (2)	1 330 000 (dont 675 000 € de travaux d'entretien)
Animation	1	Cap Atlantique	1	275 000
TOTAL	34	17 maîtres d'ouvrage publics	/	9 543 000

Synthèse du programme d'actions 2013-2018 du Pouliguen

Compte tenu de la très forte densité des zones urbaines situées aux abords de l'étier du Pouliguen et de la hiérarchisation des secteurs prioritaires retenue dans le cadre du PAPI, des mesures de réduction de la vulnérabilité ou de repli des enjeux ne paraissent pas appropriées. Des solutions de protection collectives ont donc été recherchées [Cap Atlantique, 2013], ce qui explique la très forte prédominance des mesures structurelles sur les autres types d'actions.

5.3 DÉPENSES D'INVESTISSEMENT CONSACRÉES AUX MESURES STRUCTURELLES SUR CINQ SITES EMBLÉMATIQUES

Pour donner une meilleure représentation de la façon dont les dépenses en matière de protection contre les submersions marines peuvent être organisées, cinq sites comportant un linéaire de côte important et présentant des configurations variées ont été étudiés pour évaluer la répartition des dépenses structurelles :

- l'île de Noirmoutier présente un littoral comportant à parts égales un linéaire endigué et un linéaire de dunes ;
- Yves et Châtaillon-Plage s'étendent sur un littoral sableux affecté par des phénomènes d'érosion et présentent une urbanisation sur des zones basses, ce qui implique des dispositions particulières sur le plan hydraulique ;
- Aytré et Angoulins se caractérisent par un littoral varié sur lequel la protection est à la fois assurée par les digues et par les plages ;
- l'île de Ré présente un littoral principalement protégé par des digues ;
- Le Pouliguen présente une configuration estuarienne. Le projet consiste principalement à améliorer le niveau de protection des digues bordant l'estuaire.

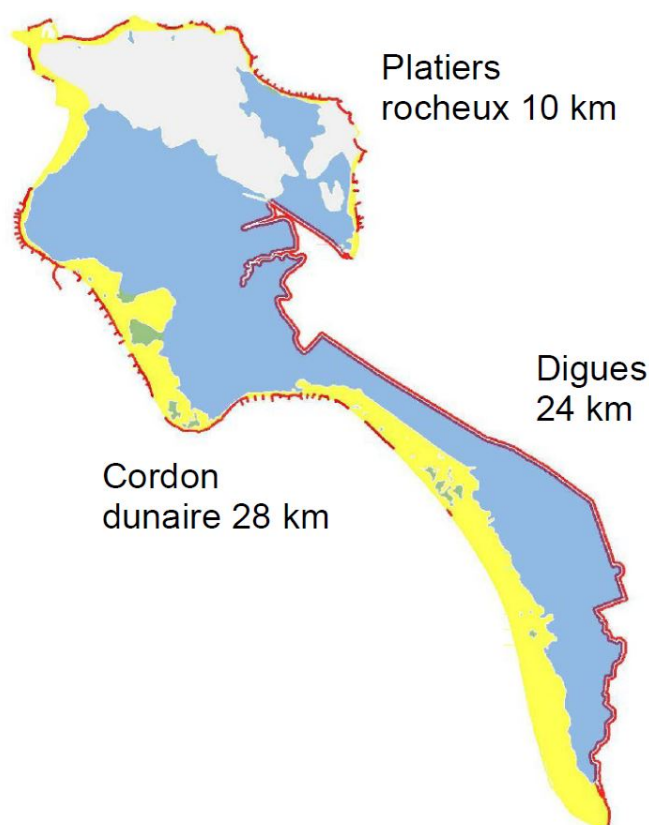
Cette étude est basée sur l'analyse détaillée des tableaux financiers des PAPI à un stade suffisamment avancé des opérations pour que les coûts puissent être considérés d'une bonne précision.

5.3.1 Dépenses d'investissement sur l'Île de Noirmoutier

Le littoral de l'île de Noirmoutier (cf. Illustration 26) est composé de :

- 28 km de cordons dunaires soumis à l'érosion (marine, éolienne et anthropique) ;
- 24 km de digues de polders classées « B », hauteur de l'ordre de 4 m ;
- 10 km de côtes rocheuses entrecoupées de criques sableuses.

Illustration 26 : composition du littoral de l'île de Noirmoutier
(source : Communauté de communes de l'île de Noirmoutier)



Le programme d'investissement 2013-2018 destiné à la mise en œuvre des mesures structurelles du PAPI présente un montant de 14,8 M€ HT, avec la répartition suivante : 1,3 M€ d'études (études géotechniques, études de danger, maîtrise d'œuvre pour les travaux) et 13,5 M€ de travaux.

Les travaux comprennent :

- un confortement et une rehausse des ouvrages présentant une faiblesse structurelle et/ou une altimétrie inférieure à 4,50 m NGF (linéaire cumulé de 3,5 km) ;
- une intervention sur les secteurs dunaires présentant des problèmes d'érosion significatifs et protégeant des enjeux humains et patrimoniaux forts (linéaire cumulé de 2 km).

D'après le bilan financier établi en janvier 2016, la répartition des travaux sur le système de protection est la suivante :

Types de travaux	Montant estimatif des dépenses HT	Pourcentage
Renforcement et rehausse des digues	3 000 000 €	22%
Travaux sur perrés et épis, rechargement de sable	6 000 000 €	44%
Sécurisation de l'entrée du port et des étiers Arceau et Coëf par des portes à marée	4 500 000 €	33%
Total	13 500 000 €	100%

Il apparaît que les travaux sur les digues ne représentent qu'un faible pourcentage des dépenses, ce qui s'explique par un programme particulièrement ambitieux sur la gestion du trait de côte (sur la façade ouest bordée par un cordon dunaire) et la sécurisation du port et des étiers.

5.3.2 Dépenses d'investissement sur Yves et Châtelailon-Plage

Le programme d'investissement engagé sur les communes de Yves et de Châtelailon-Plage intègre à la fois des interventions sur l'estran (brise-lames, rechargements de plage, restauration de la digue portuaire), sur le front de mer (de multiples digues ainsi que des batardeaux aux points de passage) et dans les terres (digue de second rang et révision complète du dispositif de ressuyage). L'illustration 27 présente le schéma d'aménagement de la partie centrale du site, au niveau des Boucholeurs (d'autres aménagements sont également réalisés sur les secteurs voisins).



Illustration 27 : plan de masse des aménagements de protection prévus au projet, Creocéan, 2014
(source : Silycaf)

Les ouvrages de protection en front de mer étant dimensionnés en fonction de l'effet des brise-lames, les dépenses correspondantes sont réunies sous la même ligne de financement. Nous adoptons le même principe dans le tableau ci-après qui synthétise l'annexe financière à l'avenant passé en CMI le 17 décembre 2015 et qui constitue une bonne approximation des dépenses réelles (à cette date, seule une partie des travaux est réalisée mais le projet est bien étudié et les estimations pour les travaux restant à lancer bénéficient du retour d'expérience sur les travaux en cours).

Type de travaux	Montant HT	Pourcentage
Brise-lames et digues de front de mer	11 900 000 €	47%
Rechargement	3 600 000 €	14%
Digues de retrait	7 900 000 €	31%
Dispositifs de ressuyage hydraulique	2 130 000 €	8%
Total	25 530 000 €	100%

Il ressort de cette analyse une répartition des dépenses qui correspond bien à la logique du projet : si des ouvrages imposants sont réalisés en protection sur l'estran et en front de mer (pour 47 % des dépenses), un effort très substantiel est consenti pour :

- redonner aux plages leur rôle naturel d'amortisseur par des rechargements massifs (14 % des dépenses) ;
- assurer la gestion des eaux dans le système notamment par des digues en retrait (31 % des dépenses) ;
- permettre en dernier recours le ressuyage rapide des zones urbaines si elles étaient affectées par une inondation (8 % des dépenses).

5.3.3 Dépenses d'investissement sur Aytré et Angoulins

Dans le cadre du PAPI de l'agglomération rochelaise, les communes d'Aytré et d'Angoulins bénéficient d'un programme d'actions qui consiste notamment à rehausser les digues, recharger les plages et installer une porte à flot sur les marais du Gâts pour limiter les submersions aux zones non urbanisées (cf. Illustration 28).

Le montant total des travaux est de 3 779 039 € HT, réparti comme suit :

Type de travaux	Montant HT	Pourcentage
Protection en enrochements des talus (digues de Godechaud, du Chay et de la Platerre)	2 895 454 €	77%
Rechargement de la plage d'Aytré	251 500 €	7%
Porte à flot des marais du Gâts	632 085 €	17%
Total	3 779 039 €	100%

Les dépenses consacrées à la protection des digues par des parements en enrochements représentent 77 % des dépenses, malgré la construction sur ce site d'un ouvrage hydraulique relativement important (17 % des dépenses). Le rechargement de plage ne représente qu'un pourcentage relativement faible (7 %).

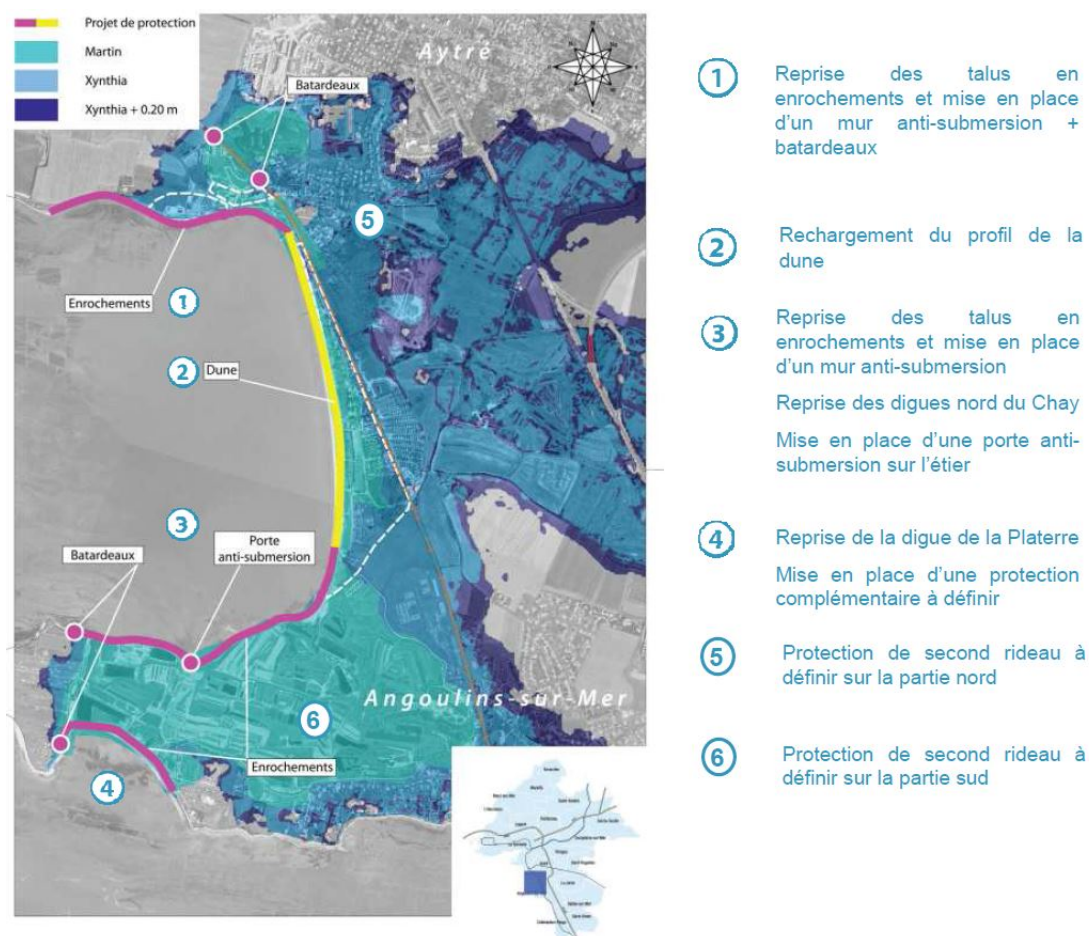


Illustration 28 : plan de renforcement des protections littorales sur Aytré-Angoulins (source : CD 17)

5.3.4 Dépenses d'investissement sur l'Île de Ré

Le programme d'investissement engagé sur l'île de Ré consiste principalement à réhabiliter les digues de front de mer par la pose d'enrochements et la construction de murets. Sur certaines zones de marais telles que Loix, des digues de second rang sont prévues. Sur le site de la Flotte, la mise en place d'une porte coulissante est destinée à contrôler les entrées d'eau dans le port. L'illustration 29 présente l'ensemble des opérations programmées sur l'île de Ré dans le cadre du PAPI.

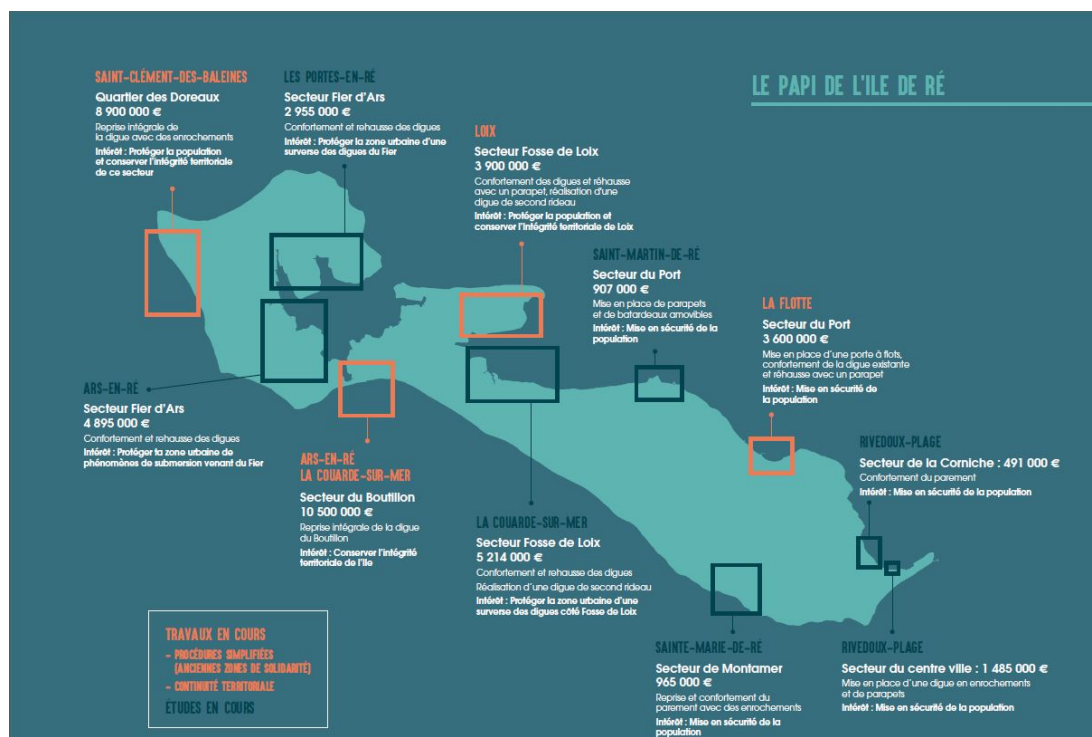


Illustration 29 : état d'avancement du PAPI de l'île de Ré en 2016
(source : Communauté de communes de l'île de Ré, 2016)

La répartition des dépenses est la suivante :

Types de travaux	Montant estimatif des dépenses HT	Pourcentage
Renforcement et exhausse des digues de front de mer	43 812 000 €	93%
Renforcement et exhausse des digues de second rang	400 000 €	1%
Sécurisation de l'entrée du port de la Flotte par une porte anti-submersion	2 941 000 €	6%
Total	47 153 000 €	100%

Il apparaît une nette prédominance des dépenses de confortement des digues de front de mer. La porte anti-submersion est un ouvrage assez exceptionnel sur le plan technique (porte coulissante) et représente 6 % du montant des travaux.

5.3.5 Dépenses d'investissement sur le Pouliguen

Deux dispositifs ont été initialement comparés :

- un système de protection linéaire passif : confortement et rehaussement des berges et digues le long de l'étier ;
- un système de protection unique actif : une porte de garde en entrée d'étier.

Même si cette dernière solution présente l'avantage de concentrer la protection sur un seul ouvrage actif, le faisceau d'inconvénients technico-économiques et environnementaux liés à ce type d'ouvrage portuaire a orienté la décision d'aménagement du Sivu du Port vers le confortement et le rehaussement des berges et digues. Le projet a été estimé à environ 8 M€ HT dont 7,4 M€ de travaux et 0,6 M€ d'études. L'illustration 30 présente la configuration du site et les digues objet des travaux.

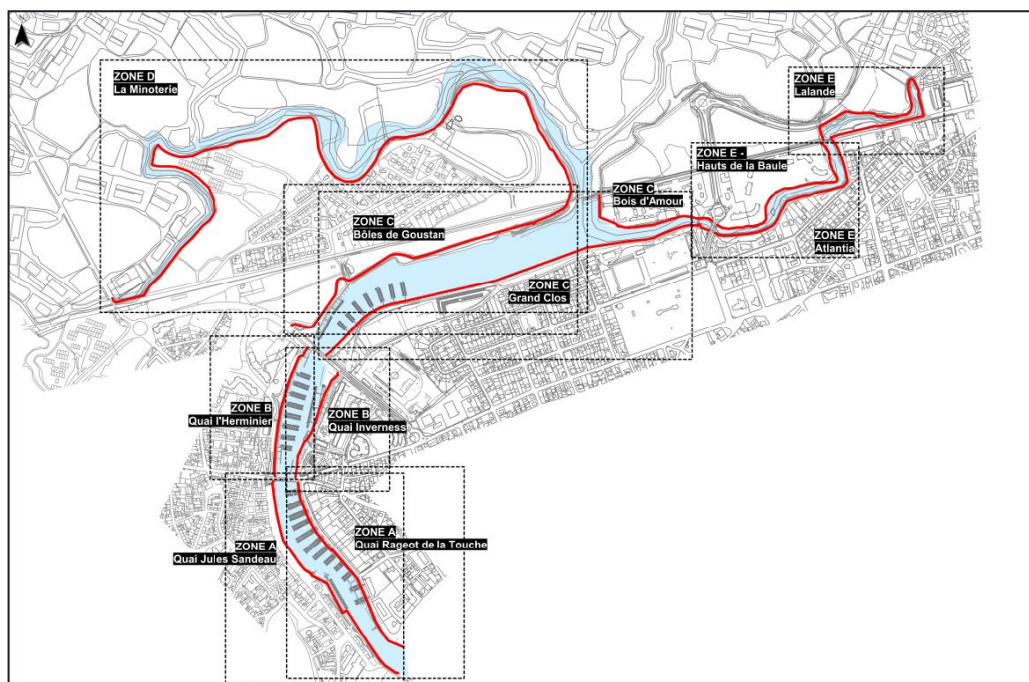


Illustration 30 : localisation des secteurs d'intervention sur le Pouliguen
(auteur : Artelia)

Dans le détail, les travaux prévus au stade d'avant-projet comprennent :

- la construction d'ouvrages de type murets en béton et d'ouvrages en béton végétalisable ;
- la réalisation de merlons de terre végétalisée et de merlons de terre végétalisée avec soutènement ;
- le confortement de berges soit par enrochements, soit par la mise en place de pieux de bois.

Le coût total de l'opération est de 6,3 M€ HT. L'essentiel de ce montant, 4,9 M€, est consacré aux structures de retenues de l'eau (en terre ou en génie civil). Le milieu urbain impose des travaux de VRD conséquents, à hauteur de 0,9 k€ HT et les mesures compensatoires (plantations, aménagement de noues) représentent 0,5 M€.

Néanmoins sur cette opération, nous retiendrons que l'ensemble des dépenses est lié directement ou indirectement au système d'endiguement.

5.4 ANALYSE COMPARATIVE DES DÉPENSES OBSERVÉES SUR LES CINQ SITES

Les digues et autres ouvrages de génie civil apportent une protection contre les submersions marines en relation avec d'autres éléments naturels : plages, dunes... L'optimisation des coûts implique de trouver un bon équilibre entre les actions de construction et d'entretien des ouvrages et la gestion des formations naturelles. Cet impératif est d'autant plus fort que les projets d'aménagement visent en général deux objectifs : non seulement assurer la sécurité des populations et des biens mais aussi assurer la bonne intégration paysagère des ouvrages, pour tenir compte de la sensibilité particulière des sites (souvent des périmètres protégés).

Le tableau suivant peut être dressé en synthèse des dépenses observées :

	Renforcement et rehausse des digues	Travaux sur perrés et épis, rechargement de sable	Digues de retrait	Ouvrages hydrauliques (portes à marée et dispositif de ressuyage)	Total
Île de Noirmoutier	3 000 000 €	6 000 000 €	0 €	4 500 000 €	13 500 000 €
	22%	44%	0%	33%	100%
Châtelailon-Plage	11 900 000 €	3 600 000 €	7 900 000 €	2 130 000 €	25 530 000 €
	47%	14%	31%	8%	100%
Aytré-Angoulins	2 895 454 €	251 500 €	0 €	632 085 €	3 779 039 €
	77%	7%	0%	17%	100%
Île de Ré	43 812 000 €	0 €	400 000 €	2 941 000 €	47 153 000 €
	93%	0%	1%	6%	100%
Le Pouliguen	6 300 000 €	0 €	0 €	0 €	6 300 000 €
	100%	0%	0%	0%	100%

Au travers de ces cinq exemples, nous pouvons constater que les parts consacrées aux différents types de structures de protection peuvent être sensiblement variables (en relation avec les linéaires associés). Il est notamment remarquable que la part consacrée aux digues varie de 22 % à 100 %, le premier cas correspondant à un site, l'île de Noirmoutier, sur lequel la protection contre les inondations passe en premier lieu par des actions de gestion des plages et des dunes et par la réalisation de portes à marée, tandis que le second cas, l'étier du Pouliguen, présente un système de protection reposant principalement sur des digues (si l'on se limite à considérer les mesures structurelles).

Les deux autres sites présentent des porte-feuilles de mesures qui, tout en laissant une place prépondérante aux digues (78 % si l'on cumule les dispositifs sur l'estran et en retrait pour Châtelailon-Plage, 77 % pour Aytré-Angoulins et 94 % pour l'île de Ré), consacrent une part non négligeable des efforts financiers aux actions de rechargement de plage et à l'amélioration des dispositifs de gestion des eaux (pertuis, portes à marée et ressuyage).

5.5 COMPARAISON ET SYNTHÈSE DES DÉPENSES RAPPORTÉES AU LINÉAIRE DE PROTECTION

Les dépenses d'investissement transcrites dans la section précédente peuvent être rapportées à des linéaires de protection. Dans les cas de Noirmoutier, de Yves et Châtelailon-Plage, d'Aytré-Angoulins et de Ré, ce linéaire de protection correspond à un linéaire de côte. Dans le cas de l'étier du Pouliguen, le linéaire retenu est le linéaire de rive bordant l'étier sur lequel le projet prévoit une révision du système d'endiguement.

Les valeurs obtenues sont les suivantes :

	Dépenses d'investissement HT (€)	Linéaire de côte (km)	Dépenses linéaires HT (€/km)
Île de Noirmoutier	13 500 000 €	7,4	1 828 030 €
Yves et Châtelailon-Plage	25 530 000 €	11,7	2 191 416 €
Aytré-Angoulins	3 779 039 €	4,0	944 760 €
Île de Ré	47 153 000 €	25,0	1 886 120 €
Le Pouliguen	6 300 000 €	7,6	828 947 €
Moyenne linéaire (€/km)			1 535 855 €

L'île de Noirmoutier, Châtelailon-Plage et l'île de Ré, exposés à l'action des vagues, sont des sites sur lesquels le renforcement de la protection est réalisé par des interventions lourdes en continu sur tout le linéaire comptabilisé. Sur des opérations de ce genre, le coût linéaire d'investissement moyen avoisine 2 M€/km, avec néanmoins de fortes disparités comme nous le verrons dans la suite de cette section.

Sur l'opération d'Aytré, site également exposé à l'action des vagues, la moitié centrale du linéaire fait l'objet d'un rechargement de plage qui ne représente que 7 % du total des dépenses. C'est la raison pour laquelle le coût linéaire se trouve réduit de moitié par rapport aux deux premières opérations.

Sur le Pouliguen, l'opération concerne un site abrité des vagues puisque les protections sont placées en bordure de l'étier. C'est ce qui explique que le coût linéaire soit plus limité, de l'ordre de 0,8 M€/km, bien que la prise en compte des milieux naturel et urbain engendre une augmentation des dépenses de l'ordre de 20 %.

Pour mieux apprécier la répartition des dépenses sur ces projets, il est instructif de comparer les coûts linéaires de protection en distinguant :

- les sections sur lesquelles le mode d'intervention principal est la construction ou le confortement de digues ;
- les sections sur lesquelles le mode d'intervention principal consiste à gérer le trait de côte sans digue (par du rechargement et des ouvrages destinés à maintenir le sable, à savoir des épis et des brise-lames).

Le tableau suivant présente les chiffres qui résultent de ces calculs.

	Dépenses d'investissement HT (€) sur sections endiguées	Linéaire de côte avec digues (km)	Dépenses d'investissement HT (€) sur sections avec gestion du trait de côte	Linéaire de côte géré sans digue (km)	Coût linéaire HT (€/km) sur section avec digues	Coût linéaire HT (€/km) sur sections gérées sans digue
Île de Noirmoutier	7 500 000 €	4,7	6 000 000 €	2,7	1 585 624 €	2 259 887 €
Yves et Châtaillon-Plage	18 800 000 €	7,7	4 800 000 €	4,0	2 457 516 €	1 200 000 €
Aytré-Angoulins	3 527 539 €	2,0	251 500 €	2,0	1 763 770 €	125 750 €
Île de Ré	47 153 000 €	25,0	0 €	0,0	1 886 120 €	NA
Le Pouliguen	6 300 000 €	7,6	0 €	0,0	828 947 €	NA
Moyenne linéaire (€/km)					1 704 395 €	1 195 212 €

Sur les sections gérées sans digues, les coûts sont en cohérence avec les résultats obtenus sur les opérations de gestion du trait de côte (cf. section 4.4.2.2), c'est-à-dire que, bien qu'il apparaisse une forte dispersion des valeurs, pour des opérations lourdes d'adaptation, sans volet terrestre et sans brise-lames :

- le coût linéaire de 2,5 M€/km peut être considéré comme un coût moyen. Cet ordre de grandeur est respecté sur l'île de Noirmoutier ;
- le coût linéaire est 1 M€ peut être considéré comme une valeur basse. C'est l'ordre de grandeur qui apparaît sur Yves et Châtaillon où les interventions en dehors des secteurs endigués sont plus limitées.

Le coût observé sur Aytré-Angoulins est beaucoup plus faible. Sur ce site a seulement été réalisé un léger rechargement du profil de dune.

Sur les sections endiguées, les facteurs déterminants déjà perçus au cours de l'analyse précédente se confirment, à savoir que dans le cas d'un site abrité des vagues, le coût linéaire est inférieur à 1 M€/km, tandis que sur des sites exposés, il est classiquement compris entre 1,5 et 2,5 M€/km.

Si l'on étudie plus précisément l'exemple de Yves et Châtaillon-Plage, on constate de fortes disparités selon les secteurs :

- sur le secteur des Boucholeurs, particulièrement complexe à gérer, les mesures de protection contre les submersions sur l'estran et à terre et les mesures de protection contre les chocs de vagues en front de mer, conduisent sur 1,5 km à une dépense de 11 M€ pour la construction des brise-lames, le confortement des ouvrages de front de mer et le système de ressuyage, soit un coût linéaire de 7,3 M€/km ;
- sur les secteurs de la réserve naturelle du marais d'Yves et de l'anse de Fouras, à l'inverse, le dispositif est principalement constitué de digues en retrait. Bien que celles-ci aient une longueur cumulée assez nettement supérieure au linéaire de côte concerné (cf. Illustration 27), le rapport des dépenses, estimées à 7,9 M€ sur la distance, approximativement de 5 km, nous donne un coût linéaire très inférieur, de l'ordre de 1,6 M€/km.

En synthèse, le tableau suivant peut être dressé sur les sections endiguées :

		Coût linéaire HT (M€/km) sur section avec digues
Système d'endiguement abrité (étier, estuaire)	enjeux humains et naturels modérés	0,5<0,6<0,7
	enjeux humains et naturels forts	0,7<0,85<1,0
Système d'endiguement exposé (front de mer ouvert)	enjeux humains et naturels modérés	1<1,5<2,0
	enjeux humains et naturels forts	2,0<3,0<7,5

6. Coûts observés sur les rechargements de plage, le transfert hydraulique et les drains de plage

Les interventions sur les plages visent en général à assurer un rétablissement de leur profil après une phase d'érosion. Trois types d'opérations destinées à répondre à cet objectif ont été recensés :

- le rechargement de plage par un apport extérieur en utilisant des moyens mécaniques. Pour ce type d'intervention, selon le contexte, les coûts associés peuvent être considérés comme des coûts d'investissement ou comme des coûts d'entretien : un rechargement à l'abri d'un ouvrage (brise-lames, épi ou butée de pied) peut être considéré comme un investissement si le sable peut être maintenu sur place durablement. Par contre des rechargements réguliers sur une plage en érosion s'apparenteront davantage à des dépenses d'entretien ;
- le rechargement de plage par l'utilisation d'un système de transfert hydraulique (*by-pass*) ;
- la stabilisation des matériaux par l'utilisation du système Écoplage® ;

Dans les deux derniers cas, nos analyses viseront à apprécier le coût d'installation du dispositif et ses coûts de fonctionnement et d'entretien. Les coûts linéaires seront également précisés.

6.1 COÛTS OBSERVÉS SUR LE RECHARGEMENT DE PLAGE

Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour le rechargement de plage (tous les prix sont exprimés en euros et hors taxes. Le mois de référence est octobre 2014).

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m ³)	Observations
Remodelage de l'estran	1	volume déplacé (m ³)	4,2	Matériel utilisé : pelle mécanique, dumper et bulldozer – travaux soumis à la marée
Transport par voie terrestre et régala	1	volume déplacé (m ³)	5 (distance 3,5 km)	Transport routier sans prélèvement in-situ
	1	volume déplacé (m ³)	18 (distance de 50 km)	
Apport par voie terrestre et remodelage in-situ	8	volume déplacé (m ³)	6,4<11<18	Ces valeurs croissent en fonction de la proportion de sable importé. Les sites d'import sont à une distance comprise entre 20 et 30 km.
Drague aspiratrice stationnaire	3	volume déplacé (m ³)	11<11,5<12 (distance comprise entre 0,2 et 0,7 km)	Volumes compris entre 5000 et 80000m ³
	3	volume déplacé (m ³)	17<18,5<20 (distance comprise entre 3,5 et 7,7 km)	
Drague aspiratrice en marche	6	volume déplacé (m ³)	1,8<3<4 (distance comprise entre 0,3 et 4 km)	Volume compris entre 100 000 et 1 Mm ³ (1 Mm ³ pour la distance la plus longue)
	5	volume déplacé (m ³)	7<8,5<10 (distance comprise entre 4 et 10 km)	

Les coûts de rechargement de plage dépendent principalement des volumes déplacés et des moyens mis en œuvre.

Utilisation exclusive de moyens terrestres :

Parmi les opérations recensées, l'une d'elles consiste en un remodelage de l'estran par la recherche de matériaux en bas de plage pour un placement en haut de plage. Ces travaux réalisés à la Teste-de-Buch (Bassin d'Arcachon, 33) sont rythmés par la marée (cf. Illustration 31). Le coût de cette opération est de l'ordre de 4 €/m³.



Illustration 31 : prélèvement (1), déplacement (2) et régalinge (3)
(source : Syndicat intercommunal du bassin d'Arcachon)

Deux opérations ont été recensées pour lesquelles l'ensemble du volume de sable considéré a une provenance extérieure à la zone de rechargement. Un coût de 5 €/m³ a été observé pour un import par voie terrestre depuis un site distant de 3,5 km et un autre à 18 €/m³ pour un site distant de 50 km [Actes journées d'études Anel, du 27 au 28 avril 2006 à Torreilles].

Dans de nombreux cas, lorsque des moyens terrestres sont utilisés pour le transport, les opérations comportent à la fois un volet d'import de sable extérieur et un volet de remobilisation du sable présent sur le site. L'import de sable par transport terrestre depuis un site plus éloigné apparaît également sur ce type d'opération comme un facteur d'augmentation sensible du montant de ces opérations. Cette observation est confirmée pour un panel d'opérations dont tout ou partie du sable est importé de sites distants de 20 à 30 km. Le coût volumique est compris entre 6,4 et 18 €/m³, cette dernière valeur pouvant être retenue dans le cas où tout le sable est importé d'un site éloigné.

Utilisation de moyens nautiques (complétés par des moyens terrestres pour le régalage)

La majorité des opérations recensées mettent en œuvre des moyens nautiques. On distingue deux types d'engins :

- la drague aspiratrice stationnaire (DAS), dont une photo est présentée en Illustration 32, est utilisée quand les volumes dragués sont inférieurs à 100 000 m³. Une conduite refoule sur l'estran les matériaux dragués. Le coût d'investissement pour une telle drague est de l'ordre de 2 M€, ce qui en fait un équipement accessible pour la gestion d'un secteur particulier (le coût de 2 M€ est donné pour l'achat de la drague Dragon en 2012 par le Siba (Syndicat intercommunal du bassin d'Arcachon)) ;



Illustration 32 : drague aspiratrice stationnaire
(source : [Syndicat intercommunal du bassin d'Arcachon, 2012])

- la drague aspiratrice en marche (DAM) qui offre des capacités supérieures. Le coût de sa mobilisation limite généralement son utilisation à des opérations dont le volume est supérieur à 100 000 m³ (sa mobilité permet de traiter plusieurs sites dans un même secteur géographique. Le déchargement de sable peut être effectué par projection aérienne comme le montre l'illustration 33 ou à l'aide d'une conduite).



Illustration 33 : drague aspiratrice en marche
(source : [Syndicat intercommunal du bassin d'Arcachon, 2012])

Les coûts volumiques dépendent donc du volume à déplacer et de la distance entre le site de prélèvement et la plage à recharger (ce qui déterminera le type de drague employé).

Si le site d'extraction est très proche du lieu de dépôt, le coût volumique est :

- pour des volumes inférieurs à 100 000 m³ (utilisation d'une DAS) : de l'ordre de 11 à 12 €/m³ (cas du ré-ensablement de la plage de la Vigne – cf. Illustration 34) ;
- pour des volumes supérieurs à 100 000 m³ (utilisation d'une DAM) : compris entre 2 à 4 €/m³.

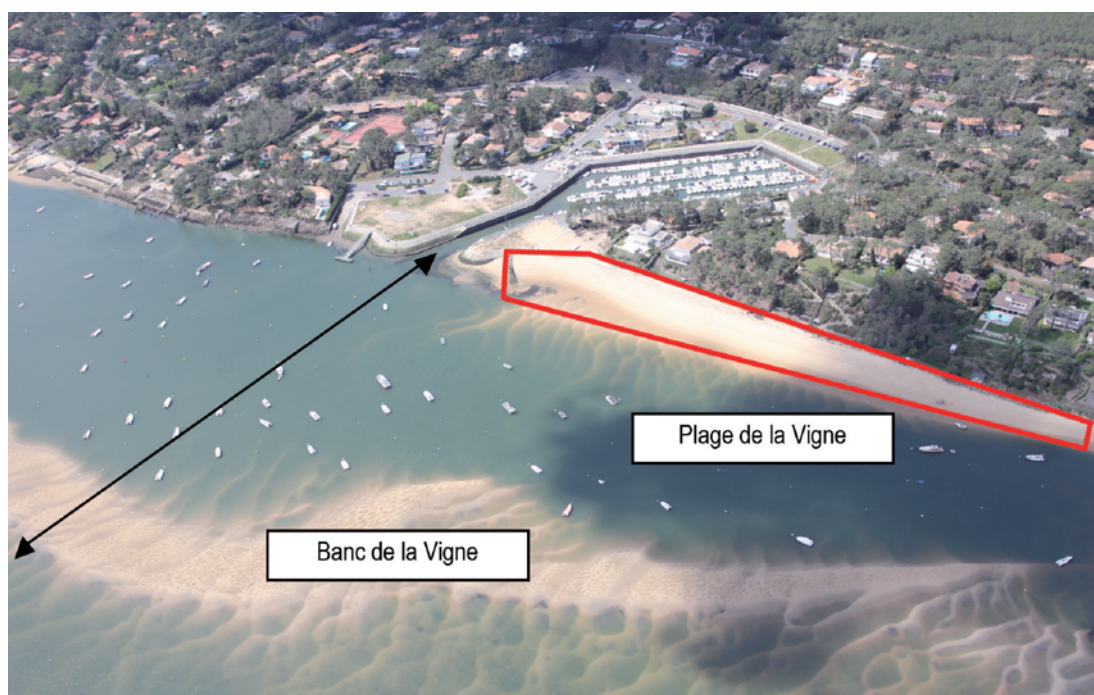


Illustration 34 : ré-ensablement de la plage de La Vigne – Commune de Lège-Cap-Ferret
(Source : [Syndicat intercommunal du bassin d'Arcachon – Rapport d'activité 2012], auteur : Michel Le Collen)

Si le site d'extraction est plus lointain, entre 4 et 10 km, les coûts augmentent sensiblement :

- pour des volumes inférieurs à 100 000 m³ (utilisation d'une DAS) : de l'ordre de 17 à 20 €/m³ ;
- pour des volumes supérieurs à 100 000 m³ (utilisation d'une DAM) : de l'ordre de 7 à 10 €/m³.

Ce dernier chiffre est confirmé par les études prospectives réalisées pour le littoral de Sète : dans le but de contrecarrer les phénomènes d'érosion du trait de côte, des prospections géophysiques ont permis d'identifier un gisement de sables fossiles (estimé à 200 millions de m³). Situé à 50 km au large de Sète, par 90 m de fond, ce gisement pourrait être exploité pour un coût moyen de 8 €/m³ [Carnon, 2008].

Il ressort de ces chiffres qu'un écart important de coût existe suivant que l'on utilise une DAM ou une DAS. Ce rapport est de l'ordre de deux dans le cas de sites d'extraction éloignés et de l'ordre de quatre pour des sites d'extraction proches. Cet écart explique qu'en pratique il existe peu d'opérations de dragage dont le volume est compris entre 30 000 et 100 000 m³. Il est en effet préférable, dans la mesure du possible, de procéder à une opération de rechargement massif plutôt qu'à de multiples opérations apportant un volume équivalent.

La dernière opération réalisée sur Châtelailon est atypique du fait de l'éloignement du site d'extraction : 60 000 m³ de sable ont été importés d'un site distant de 18 km, pour un coût volumique de 19 €/m³ (valeur octobre 2014).

Du fait des contraintes techniques, un chantier peut aussi nécessiter la mobilisation coordonnée d'une DAS et d'une DAM. Un exemple de ce type de chantier est décrit dans la section 7 relative aux cordons dunaires.

Notons enfin que le coût des levés topographiques associés à ces opérations est de l'ordre de 3 % [Cete Méditerranée, mars 2011] du montant des marchés de travaux.

6.2 COÛTS OBSERVÉS SUR LE SYSTÈME DE TRANSFERT HYDRAULIQUE (*BY-PASS*)

Le dispositif de transfert hydraulique (*by-pass*) n'a été implanté en France que sur un seul site : Capbreton. Le contexte de cette opération a été présenté en section 4.3.4.

Le *by-pass* fonctionne avec un hydro-éjecteur. Le mélange d'eau et de sable est aspiré sur la plage au nord du chenal du Boucarot et refoulé vers les plages méridionales par une conduite passant sous le chenal et sous le boulevard du front de mer. Le débit en sable est de 250 m³/h. Un bâtiment abrite le système de pompage et la Ville de Capbreton a par ailleurs acquis un chargeur sur pneu et un boteur pour achever la mise en place des matériaux [Marie-Claire Prat et Christine Clus-Auby, 2006]. L'illustration 35 présente ces différents éléments.

Les coûts d'investissement, de fonctionnement et d'entretien sont présentés de manière synthétique dans le tableau suivant.

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût d'investissement	Coût linéaire d'investissement (€/ml)	Coût linéaire de fonctionnement et d'entretien (€/ml)	Unité	Coût de fonctionnement (€/m ³)	Observations
Hydro-éjecteur, conduite et matériel de terrassement	1	4 200 000	3 231	215	volume déplacé (m ³)	2,8	Déplacement annuel de 100000 m ³ /an



(1)



(2)



(3)

Illustration 35 : canalisation débouchant sur les plages (1), matériel utilisé pour l'étalement (2), abri pour la station de pompage et la station relais (3)
(source : Forum technique TP)

6.2.1 Dépenses d'investissement

Le montant total des dépenses d'investissement est de 4 200 000 € HT (valeur octobre 2014) pour un linéaire de rechargement de 1 300 m soit un coût linéaire de 3 230 €/ml.

6.2.2 Dépenses de fonctionnement et d'entretien

Concernant le fonctionnement et l'entretien, sur la base de la première année d'exploitation (opération de rechargement entre mi-mars et mi-juin 2008), le système de transfert hydraulique a permis un rechargement initial en sable des plages sud d'environ 100 000 m³ pour un montant de 280 000 €, soit 2,8 €/m³ en phase d'exploitation (le coût linéaire d'exploitation est de 215 €/ml).

6.3 COÛTS OBSERVÉS SUR LES DRAINS DE PLAGE

Le dispositif Écoplage® comprend essentiellement une station de pompage et des drains, qui peuvent être positionnés sur une ou plusieurs lignes sur la plage. Le nombre de rangées influence relativement peu les coûts d'investissement et de fonctionnement qui présentent sur les différents sites des valeurs proches :

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire d'investissement	Coût linéaire annuel de fonctionnement rapporté au mètre de plage (€/ml)	Observations
Drains, station de pompage et conduite de refoulement	6	1500<1700<1800	18<23<27	

Le principe et un exemple de réalisation du dispositif sont présentés en Illustration 36.



Illustration 36 : principe (source : Écoplage® - <http://www.ecoplage.com/>] (1)
et réalisation du dispositif Écoplage® à Quend (80) [Syndicat mixte baie de Somme Grand littoral picard] (2)

6.3.1 Dépenses d'investissement

Les dépenses d'investissement au mètre linéaire de plage équipée sont relativement stables, comprises entre 1 500 et 1 800 €/ml.

Ces montants ne comprennent pas les prestations intellectuelles de conception, d'étude d'impact et de suivi scientifique.

Pour la plage sud de Rivedoux, île de Ré (17), 900 m de drain sont prévus. Les études de conception sont évaluées à 175 000 € TTC pour un montant de travaux de l'ordre de 1 500 000 € TTC. Les études préliminaires comprennent notamment la pose de onze sondes piézométriques chargées de tester la perméabilité de la plage, de mesurer la nappe phréatique marine dans l'estran sableux et de calculer le débit de drainage du milieu [<http://www.realahune.fr/mon-cher-sable/>].

L'ensemble des prestations intellectuelles accompagnant les travaux d'installation du dispositif de drainage représentent donc sans doute un pourcentage supérieur à celui couramment observé (10 %).

6.3.2 Dépenses de fonctionnement et d'entretien

Les coûts de fonctionnement rapportés au linéaire de plage sont très faibles en comparaison des coûts d'investissement : entre 18 et 27 €/ml, soit environ 1,5 % du coût d'investissement. Ces dépenses consistent principalement en la fourniture d'énergie pour le pompage : dans le cas des Sables d'Olonne, sur la dépense annuelle de 19 000 €/an, plus de 17 000 €/an sont destinés aux consommations d'électricité, la somme restante étant dédiée à la gestion du poste de relèvement.

Pour calculer des coûts volumiques et les comparer à ceux du rechargement, il est nécessaire de prendre en compte dans le cas du drainage de plage non seulement le sable accumulé mais aussi le sable qui a été maintenu sur place et qui serait parti sans la mise en place du procédé. À défaut de pouvoir mener cette étude de façon systématique (nécessité d'établir des estimations sur la base des évolutions réelles et hypothétiques des profils de plage), nous citerons simplement [Adrien Lambert et al., 2007] qui établit pour la plage d'Agay sur la commune de Saint-Raphaël une comparaison entre le coût de fonctionnement d'Écoplage® et celui des opérations de rechargement (dans la citation ci-dessous, les valeurs sont actualisées à octobre 2014) :

« Sur le plan financier, l'implantation d'Écoplage® revient à 1,0 M€ hors taxes (hors études de faisabilité, d'impact et suivis scientifiques). Ce chiffre important est à mettre en rapport avec les faibles coûts d'entretien qu'il génère – 6 000 à 7 000 €/an² – en comparaison des opérations de rechargement : 100 000 à 150 000 €/an (chiffres municipalité de Saint-Raphaël). Si l'expérience se révèle positive à long terme (pas d'autres interventions nécessaires à la stabilisation de la plage), ce système permettra donc des économies sur les budgets d'entretien des plages. »

² Les valeurs obtenues auprès de la mairie et qui comprennent le fonctionnement et l'entretien sont plus proches de 10 000 € en 2011.

7. Coûts observés sur les cordons dunaires

Comme tout milieu naturel aménagé, les cordons dunaires doivent faire l'objet d'une gestion et d'un entretien réguliers. Par ailleurs, localement, des opérations lourdes d'investissement peuvent être menées pour créer ou réhabiliter des cordons dunaires.

Un fort contraste existe entre les façades :

- sur les façades atlantique et Manche-mer du Nord, le linéaire de dunes est très important. L'Office national des forêts (ONF) assure la gestion et l'entretien sans qu'aucune opération de création ou de réhabilitation ne soit menée ;
- sur la façade méditerranéenne, les linéaires de dunes sont sensiblement plus faibles. L'Entente interdépartementale de démoustication (EID) apporte un appui technique aux collectivités territoriales pour mener des opérations de création et de réhabilitation. Bien que l'EID intervienne aussi pour la gestion et l'entretien des cordons dunaires existants, la dispersion de ces opérations ne permet pas de disposer d'un socle de données suffisant pour pouvoir envisager une analyse comparative avec les coûts de gestion et d'entretien observés sur le domaine géré par l'ONF.

Dans un premier temps, nous étudierons donc les **dépenses liées à la gestion et à l'entretien en considérant les façades atlantique et Manche-mer du Nord**. Ces dépenses visent à protéger les dunes existantes de l'érosion éolienne et à favoriser le dépôt du sable. Elles visent aussi à préserver les dunes et leur végétation du piétinement. Les principales activités sont la couverture avec des débris végétaux, l'installation de ganivelles, de clôtures et de brise-vent, ainsi que la végétalisation. Les dépenses dépendent beaucoup de la capacité de la végétation à maintenir le sable et par conséquent varient en fonction des conditions climatiques propres à chacune des façades littorales. Ce type d'activité concernant de très grands linéaires, il est possible, en particulier sur le littoral atlantique, de calculer des dépenses annuelles moyennes rapportées au kilomètre de dune.

Dans un deuxième temps, en complément des moyennes annuelles calculées dans la première partie de cette section, nous évaluerons les coûts linéaires d'intervention sur des **interventions particulières de travaux** et pour cela nous distinguerons :

- la création de cordons dunaires : il s'agit de créer le massif dunaire et de le protéger de l'érosion éolienne et du piétinement ;
- la réhabilitation de cordons dunaires : il s'agit de recharger un cordon existant (éventuellement de combler les brèches) et de le protéger de l'érosion éolienne et du piétinement ;
- les opérations particulières d'entretien.

Les deux premiers types d'intervention – opérations lourdes d'investissement – ont principalement été observés sur le littoral méditerranéen (EID intervenant souvent en maîtrise d'œuvre), le dernier est surtout observé sur le littoral atlantique.

Dans un troisième temps, nous préciserons le coût des **techniques particulières** qui sont utilisées tant en entretien que sur des opérations de création ou de réhabilitation : coût des rechargements de sable, des ganivelles, des clôtures, de la végétalisation, des couvertures...

7.1 DÉPENSES DE GESTION ET D'ENTRETIEN

Cette partie est consacrée à l'étude des dépenses linéaires annuelles moyennes pour la gestion et l'entretien des dunes. Elle repose principalement sur les dépenses observées sur la façade atlantique.

Avant de présenter les chiffres, précisons les objectifs, le contexte et la consistance des interventions.

Les objectifs de ces interventions sont multiples : non seulement protéger contre les aléas de submersion marine et de recul du trait de côte en constituant un stock de sable mais aussi protéger contre la mobilité dunaire et contre les envols de sable dans les terres.

La disponibilité du sable dans l'avant-plage est un paramètre déterminant. Dans les régions qui disposent de stocks de sable très importants – en particulier la Nouvelle Aquitaine – les ganivelles et les brise-vent sont plus rapidement ensevelis, ce qui conduit à de nouvelles interventions pour accumuler le sable sur la dune : addition d'un étage supplémentaire (pour cela sont utilisés des ganivelles de hauteur 0,5 m et des filets en fibre de coco).

L'évolution des dunes dépend non seulement des dispositifs favorisant le dépôt du sable transporté par le vent (ganivelles ou brise-vent), mais également de la présence à sa surface d'une végétation.

La végétation des secteurs dunaires en évolution (du fait de la dynamique sableuse) est essentiellement composée de plantes herbacées : principalement l'oyat (appelé aussi goubet en Nouvelle Aquitaine) et l'agropyron. En France, la variété des climats (cf. Illustration 37) favorise plus ou moins le développement de la végétation (sensible à la pluviométrie et à la température) et le déplacement du sable (fonction de la force et de la direction du vent). Schématiquement, en longeant la côte atlantique de la Bretagne vers la Nouvelle Aquitaine :

- la pluviométrie diminue jusqu'à l'embouchure de la Gironde (puis réaugmente légèrement au sud) ;
- la température et l'efficacité du vent augmentent.

Sur le littoral méditerranéen, la pluviométrie est encore plus faible, la température plus élevée et le vent plus efficace.

Ces conditions amènent à des modes d'intervention différenciés selon les régions :

- sur la façade Manche-mer du Nord, la végétation peut se développer naturellement et des interventions régulières ne sont en général pas nécessaires ;
- sur la façade atlantique, des actions d'accompagnement doivent être entreprises régulièrement pour favoriser le développement de la végétation (actions de plus en plus soutenues du nord vers le sud) ;
- sur la façade méditerranéenne, le développement de la végétation est assuré à la fois par des plantations et des actions d'accompagnement plus régulières.

Les coûts d'entretien et de gestion définis dans la présente section pour la façade atlantique correspondent donc à des valeurs supérieures à ce qu'elles doivent être sur le littoral de la Manche-mer du Nord et à des valeurs inférieures à ce qu'elles peuvent être sur le littoral méditerranéen.

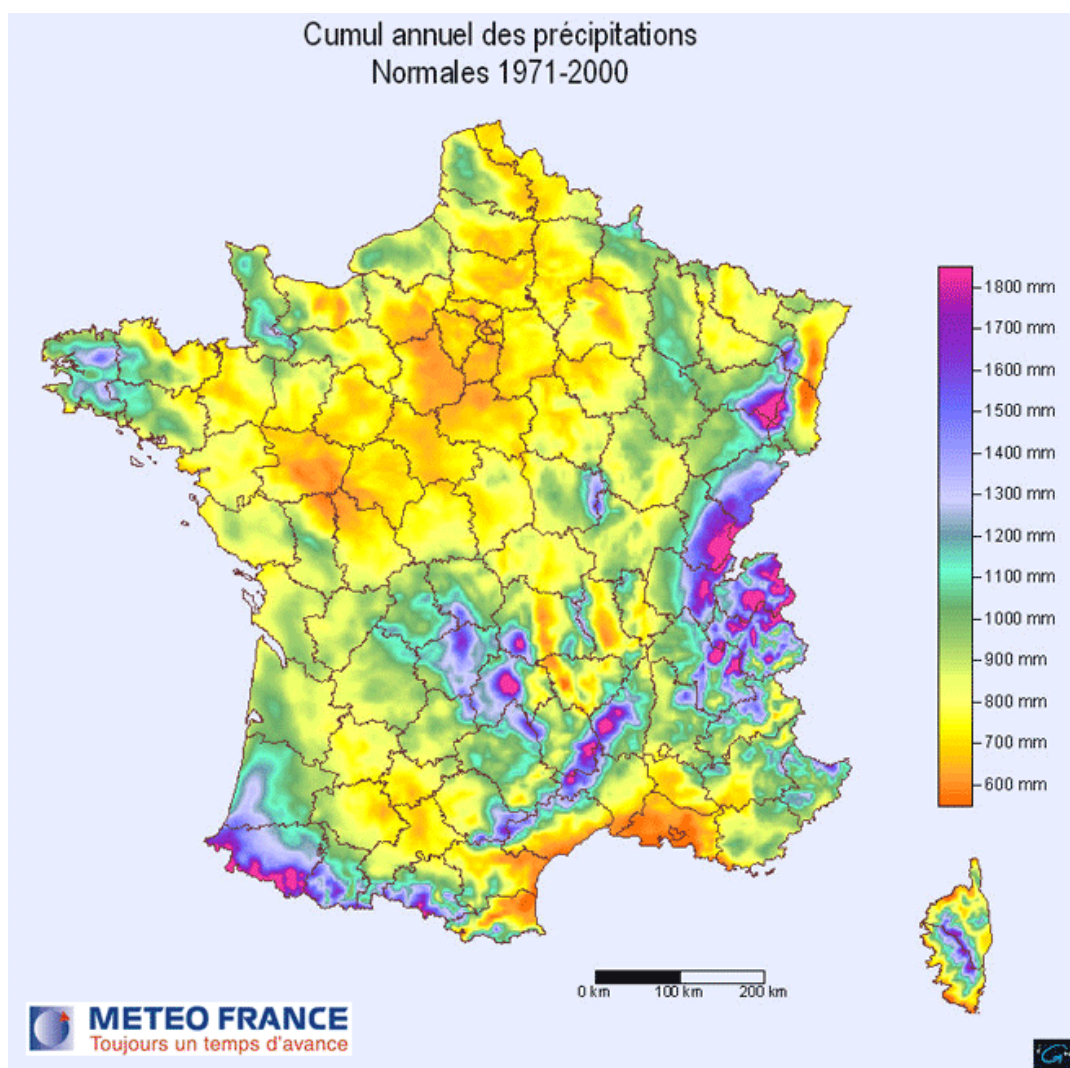


Illustration 37 : pluviométrie moyenne observée en France entre 1981 et 2010
(Source : Météo France)

7.1.1 Dépenses annuelles observées sur la façade Atlantique

L'ONF gère une grande partie du littoral métropolitain français : 510 km recouvrant 104 000 ha. Sa principale intervention en métropole concerne les dunes domaniales : 380 km de dunes situées essentiellement sur la côte atlantique (320 km) entre la Loire et l'Adour. La plus grande partie de ces dunes fut fixée par boisement à base de pins maritimes au XIX^e siècle. Cependant, la dune bordière non boisée, sous l'action de la mer et du vent, garde toujours une certaine mobilité, parfois aggravée par la fréquentation.

Les travaux de maintien des dunes littorales s'appuient sur une connaissance fine des situations locales et s'inscrivent dans la logique des processus naturels. Le profil recherché correspond à la succession la plus complète possible des faciès écodynamiques (cf. Illustration 38). Ce « contrôle souple » mis en œuvre par l'ONF permet de minimiser les dépenses : plus l'écosystème objectif est proche des tendances naturelles, moins l'énergie nécessaire à son maintien est forte et plus les coûts sont réduits. L'expérience montre que les entretiens réguliers sont nettement moins coûteux que de lourdes restaurations périodiques [ONF, mission Littoral, septembre 2006].

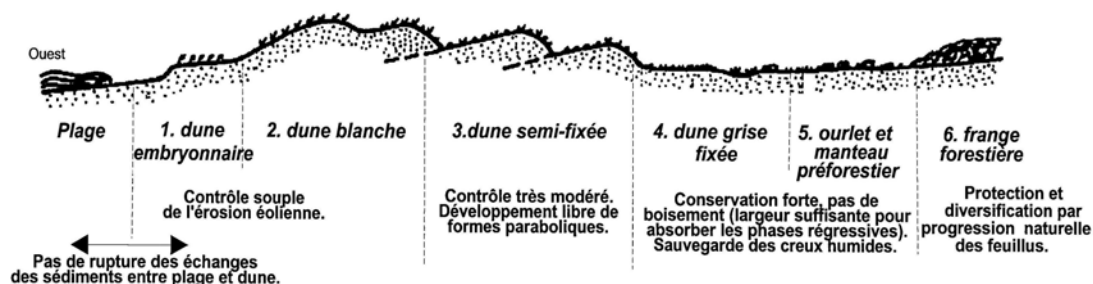


Illustration 38 : Schéma des faciès de dunes littorales atlantiques
(source : ONF)

Le principe consiste à réguler la capacité érosive du vent en réduisant sa vitesse, en facilitant son écoulement et en augmentant la cohésion de la couche superficielle du « sol » dunaire. Les techniques les plus répandues sont de quatre types :

- les couvertures de débris végétaux (cf. Illustration 39 à gauche) : branchages fins (buissons de genêt, de bruyère à balais...) ou gros branchages (pin maritime, chêne vert...) ;
- les plantations (cf. Illustration 39 à droite) : principalement l'oyat sur la dune blanche et l'agropyron en pied de dune ;
- les brise-vent (filets de coco) ;
- et les modelages.



(1)



(2)

Illustration 39 : couverture de genêts (1) et plantation d'oyat et d'agropyron à Messanges, Landes (2)
(source : ONF)

L'illustration 40 montre comment ces modes d'action sont mis en œuvre sur les secteurs connaissant une alternance de phases d'érosion marine et de répit, mode de fonctionnement fréquent sur la côte atlantique.

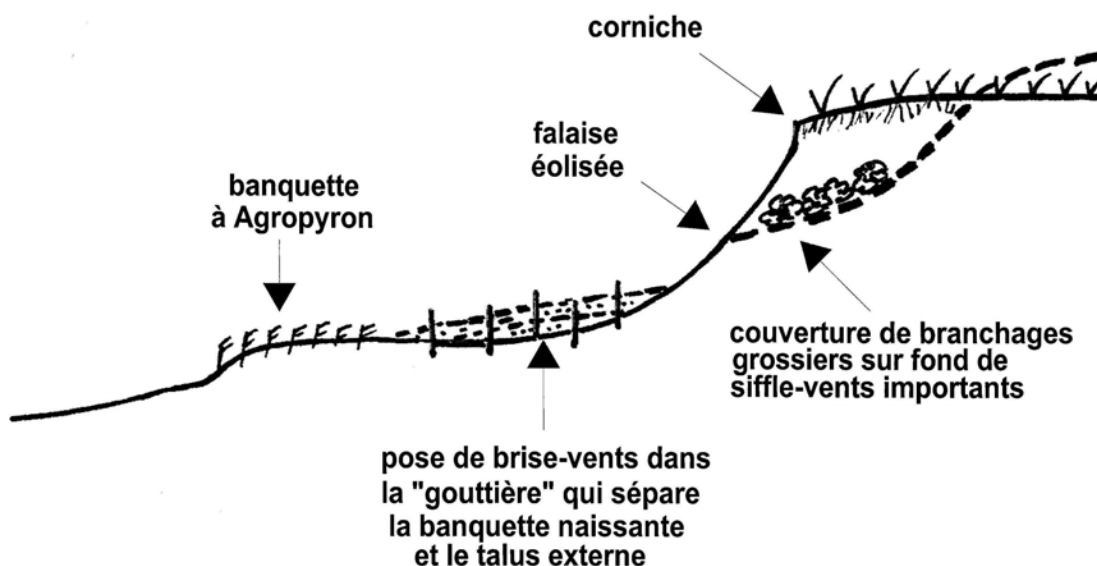


Illustration 40 : principes d'intervention sur des secteurs d'alternance de phases d'érosion marine et de phases de répit (source : ONF)

Dans tous les cas, l'ONF s'appuie sur la tendance naturelle des obstacles meubles à prendre un profil aérodynamique et cherche à faciliter la colonisation végétale naturelle.

Dans le cadre de sa « mission d'intérêt général de stabilisation des dunes littorales du domaine forestier privé de l'État (MIG Dunes) », l'ONF fait état des dépenses suivantes dans les rapports d'activité de ces trois dernières années (dépenses prenant en compte les coûts indirects) :

- 2012 : 1 600 000 € TTC
- 2013 : 1 600 000 € TTC
- 2014 : 1 900 000 € TTC

L'augmentation des dépenses en 2014 est liée à la succession de tempêtes de l'hiver 2013-2014. Ces tempêtes ont perturbé l'interface plage-dune. Cet état de perturbation favorise les mouvements de sable. Pour limiter ce phénomène, des interventions de lutte contre l'érosion éolienne (pose de brise-vent et couvertures) plus soutenues ont été menées.

Face à une succession exceptionnelle de tempêtes, on constate donc une augmentation relativement modérée des dépenses sur les dunes (inférieure à 20 %). L'activité régulière de gestion et d'entretien des dunes peut donc être considérée comme un « amortisseur » efficace en termes de dépenses.

Le rapport d'activité 2014 de l'ONF présentant les dépenses de l'année 2014 privée pour des raisons de comptabilité interne du mois de janvier. Les chiffres qui y figurent correspondent donc à ceux d'une année « normale sur le plan météorologique » : la somme est égale à 1 575 000 € TTC (soit 1 317 000 € HT). Nous utiliserons donc directement ces chiffres pour présenter l'état de répartition des dépenses de gestion et d'entretien. C'est l'objet du tableau suivant qui indique également les pourcentages :

	Dépenses annuelles observées sur 380 km de dunes (€/an HT)	Dépenses linéaires annuelles observées (€/km/an HT)	Pourcentages
Lutte contre l'érosion éolienne	579 000 €	1 524 €	44%
Protection contre le piétinement (pose et entretien clôtures...)	414 000 €	1 089 €	31%
Signalisation	51 000 €	134 €	4%
Protection et restauration des espèces et milieux	78 000 €	205 €	6%
Confortement frange forestière (entretien et régénération boisement)	15 000 €	39 €	1%
Étude	37 000 €	97 €	3%
Mise en sécurité (retrait blockhaus, écrêtement et reprofilage dunes)	143 000 €	376 €	11%
Total	1 317 000 €	3 466 €	100%

L'illustration 41 présente les pourcentages sous une forme graphique. La lutte contre l'érosion éolienne et la protection contre le piétinement, actions qui contribuent directement à la protection contre les aléas côtiers, représentent 75 % des dépenses. En complément, les autres actions visent la préservation des milieux naturels et la sécurité du public.

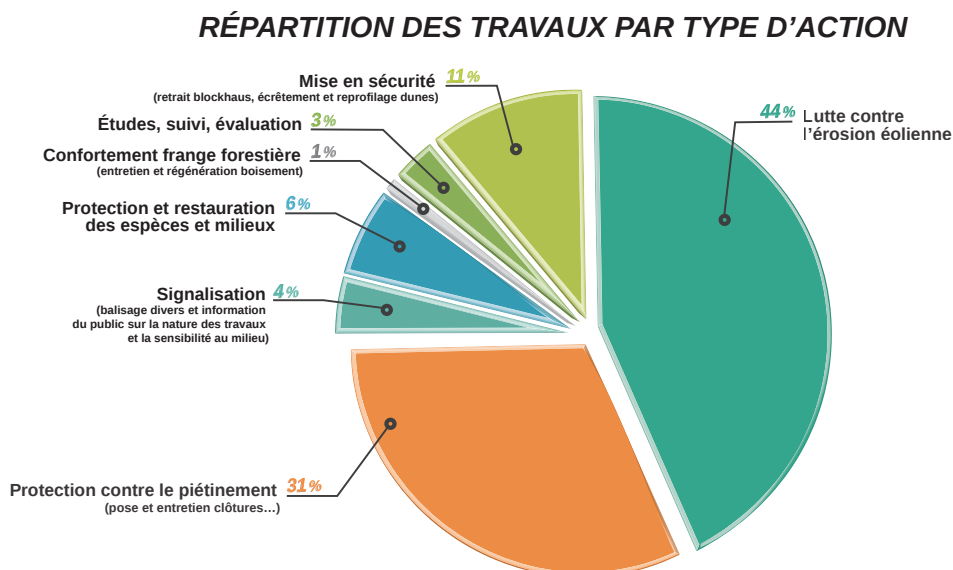


Illustration 41 : répartition des dépenses par type d'action
(source : ONF)

La lutte contre l'érosion éolienne regroupe plusieurs types de travaux. La répartition des dépenses est la suivante :

	Dépenses annuelles observées sur 380 km de dunes (€/an HT)	Dépenses linéaires annuelles observées (€/km/an HT)	Pourcentages
Couverture	300 000 €	789 €	52%
Brise-vent	110 000 €	289 €	19%
Remodelage	129 000 €	339 €	22%
Plantations oyats	40 000 €	105 €	7%
Total	579 000 €	1 524 €	100%

Les parts des dépenses relatives à ces travaux sont présentées en Illustration 42.

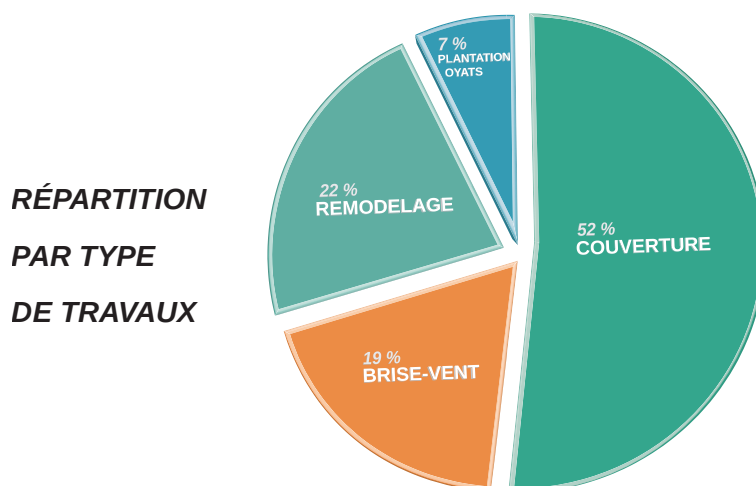


Illustration 42 : lutte contre l'érosion éolienne - Répartition des dépenses par type de travaux
(source : ONF)

Les actions de couverture constituent sensiblement la moitié des dépenses. L'autre moitié est principalement destinée aux brise-vent et au remodelage (au cours d'un hiver, les filets brise-vent sont posés à plusieurs reprises au même endroit pour compléter le dispositif déjà en place, jusqu'à trois fois sur le cordon aquitain).

Les plantations d'oyats ne représentent qu'un pourcentage relativement faible (7 %), la végétation se développant en général naturellement dès lors que les conditions favorables sont créées (notamment par les actions de couverture). En Nouvelle Aquitaine, les plantations apparaissent plus nécessaires que dans la partie nord de la façade littorale.

Les coûts d'intervention varient en fonction :

- de la configuration des sites (une forêt bordant une dune permettra des actions conjointes d'entretien de la forêt et de couverture de la dune) ;
- de l'implantation géographique de l'équipe d'ouvriers de l'ONF.

7.1.2 Synthèse sur la façade Atlantique et extrapolation sur la façade méditerranéenne

7.1.2.1 Synthèse des coûts observés sur la façade Atlantique

De façon synthétique, sur la base des deux tableaux précédemment présentés, les dépenses linéaires annuelles consenties sur la façade atlantique sont les suivantes :

	Dépenses linéaires annuelles observées (€/km/an HT)	Pourcentages
Études	97 €	3%
Signalisation, protection des espèces et restauration des milieux, confortement de la frange forestière et mise en sécurité	755 €	22%
Pose et entretien des clôtures (ganivelles, grillages et fils lisses)	1 089 €	31%
Couverture	789 €	23%
Brise-vent	289 €	8%
Remodelage	339 €	10%
Plantations oyats	105 €	3%
Total	3 465 €	100%

Il apparaît tout d'abord qu'une faible part des dépenses (3 %) est consacrée aux études, ce qui est une caractéristique normale des actions de gestion et d'entretien. 97 % des dépenses sont donc consacrées à des interventions sur le terrain. Ces interventions portent sur deux grands ensembles :

- des actions visant à assurer la sécurité du public et à répondre à des problématiques écologiques. Ces dépenses représentent 22 % du total ;
- des actions visant à assurer la préservation des dunes du piétinement et le stockage du sable. Ces dépenses représentent 75 % du total. La décomposition des coûts fait ressortir que :
 - les deux plus grands postes de dépense sont pour la pose et l'entretien des clôtures de différents types (ganivelles, grillages ou fils lisses) et pour les actions de couverture qui représentent en cumulé 54 % ;
 - deux autres postes prennent des parts significatives : la pose de brise-vent et le remodelage de dunes représentent un total cumulé de 18 % ;
 - les plantations d'oyats ne représentent que 3 % sur la façade atlantique.

7.1.2.2 Extrapolation sur la façade méditerranéenne

Pour extrapoler ces chiffres sur la façade méditerranéenne, il est nécessaire d'apprécier les similitudes et les différences sur les modes d'intervention en comparaison des pratiques sur le littoral atlantique. D'après [EID, septembre 2013], deux techniques principales sont employées sur le littoral méditerranéen :

- l'utilisation de ganivelles avec les fonctions de brise-vent et de clôture (comme sur le littoral atlantique) ;
- la végétalisation et l'emploi de couvertures mortes (géotextile biodégradable ou paillage végétal). Cette couverture morte assure à la fois la stabilisation et le maintien de l'humidité du sol pour l'enracinement de la plante. Cette disposition est nécessaire du fait de la force du vent et de la faible pluviométrie.

Il apparaît donc qu'aux actions destinées à limiter l'exposition des dunes au piétinement et à accumuler le sable, s'ajoutent d'autres actions destinées à assurer l'enracinement des plantes. Ces travaux peuvent faire l'objet d'estimations sur la base des prix suivants [EID, septembre 2013] :

- végétalisation : 5 €/m² avec prélèvement et semis in situ 15 €/m² avec plants de pépinière ;
- couverture morte (phragmite ou géotextile biodégradable) : 5 €/m².

Toutefois les travaux d'entretien associés au maintien de la végétation ne peuvent être considérés que comme « très variables ».

En conclusion, si une valeur de l'ordre de 3 500 €/km/an peut être retenue pour les dépenses annuelles de gestion et d'entretien sur le littoral atlantique, sur le littoral méditerranéen, ces dépenses peuvent certainement être estimées à une valeur supérieure pour au moins deux raisons :

- un climat plus défavorable à la végétation ;
- un environnement et un mode de gestion qui, en général, ne permettent pas, pour les actions de couverture, les mêmes synergies entre l'exploitation des forêts et l'entretien des dunes.

Nous proposons de retenir comme ordre de grandeur **5 000 €/km/an sur le littoral méditerranéen.**

A contrario, sur le littoral de la Manche et de la mer du Nord, les rares interventions menées sur les dunes conduisent à proposer des estimations de dépenses annuelles de gestion et d'entretien comprises entre 0 et 1 000 €/km/an.

7.2 COÛTS DES OPÉRATIONS PARTICULIÈRES DE CRÉATION OU DE RÉHABILITATION

Selon l'objet de l'opération et les techniques employées, les coûts de ces opérations peuvent varier sensiblement. En introduction de cette section, nous présentons un tableau synthétique des principaux résultats obtenus :

Objet de l'opération	Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)
Création de cordon dunaire	Apport massif de sable	4	300<500<700
	Bourrelet d'amorçage	NA (Valeur calculée)	220
Réhabilitation et confortement de cordon dunaire	Apport massif en front de mer	3	250<290<320
	Intervention sur cordons dunaires intérieurs	1	100
Fermeture de cordon dunaire en intervention d'urgence	Apport de sable	1	70

Les coûts associés à chaque type d'opération sont variables, notamment parce que le coût volumique varie suivant l'origine du sable et que les coûts de végétalisation introduisent une variabilité supplémentaire.

À noter aussi que de plus en plus de projets de réhabilitation des habitats dunaires d'arrière-dunes sont réalisés [EID, septembre 2013] et que souvent ce type de projet inclut le traitement des plantes invasives, ce qui peut engendrer des surcoûts. Ces surcoûts apparaîtront comme relativement faibles sur les opérations d'investissement mais la lutte contre les plantes invasives peut apparaître comme beaucoup plus pénalisante sur le long terme, car des travaux récurrents peuvent s'avérer nécessaires. Par exemple, dans le cas de la restauration du massif dunaire de l'Espiguette, 51 100 € HT sur 846 000 € HT ont été consacrés à cette mission, soit 6 % du coût total (l'année suivante, une seconde intervention était prévue pour une somme de 5 900 € HT, soit 0,7 % du montant initial).

7.2.1 Création des cordons dunaires

La création de cordons dunaires peut s'effectuer par un apport massif de sable puis par la mise en place de protections (ganivelles, délimitation des accès, plantations) destinées à protéger l'ouvrage des effets du vent et des piétinements.

Une solution alternative consiste à créer un bourrelet d'amorçage dunaire et à disposer des ganivelles pour piéger le sable et constituer le massif dunaire [EID, septembre 2013]. Cette solution est envisageable lorsque les conditions de vent sur le site le permettent : vent dominant transversal et suffisamment puissant (la vitesse seuil du vent dépend de la granulométrie).

7.2.1.1 Création d'un cordon dunaire par apport massif de sable

Les opérations de création de cordons dunaires recensées se concentrent principalement sur les côtes d'Occitanie :

- travaux de réhabilitation de cordons dunaires de premier rang sur les secteurs de Sète, Petit Travers, Vias, Frontignan, Valras, Villeneuve-lès-Maguelone ;
- travaux de réhabilitation d'un cordon dunaire de second rang sur le massif de l'Espiguette (Le Grau-du-Roi, 30) ;
- opérations antérieures à 2009 sur des cordons dunaires positionnés en première ligne de défense. Ces opérations sont présentées dans l'étude [Cete Méditerranée, 2011].

La différence de positionnement (en premier ou en second rang) ne conduit pas à une modification sensible des coûts. De l'exploitation des données recueillies, il ressort que la création d'un cordon dunaire coûte entre 300 et 700 €/ml, coût cohérent avec ceux figurant dans [EID, septembre 2013] qui situe ce coût entre 400 et 600 €/ml (fourchette plus restreinte mais centrée sur la même valeur de 500 €/ml). Ce coût comprend :

- l'amenée du sable ;
- sa mise en œuvre par moyens terrestres ;
- la pose de ganivelles et la végétalisation.

L'Illustration 43 présente le quadrillage de ganivelles utilisé pour maintenir le sable et provoquer de nouveaux dépôts.

L'amenée du sable est effectuée par moyen nautique (excepté dans le cas du massif de l'Espiguette où le sable a été prélevé sur la zone en accrétion de la plage).

Le volume de sable mis en place varie en général de 15 à 30 m³/ml avec un coût compris entre 8 et 20 €/m³, l'implantation de ganivelles conduisant à moyen terme à un stockage supplémentaire de sable.



Illustration 43 : reconstitution d'un système dunaire côtier
(auteur : EID Méditerranée)

7.2.1.2 Création d'un cordon dunaire par bourrelet d'amorçage

Lorsqu'un stock de sable peut être mobilisé par les vents dominants, il peut être plus opportun de créer le cordon dunaire par l'implantation initiale d'un bourrelet d'amorçage.

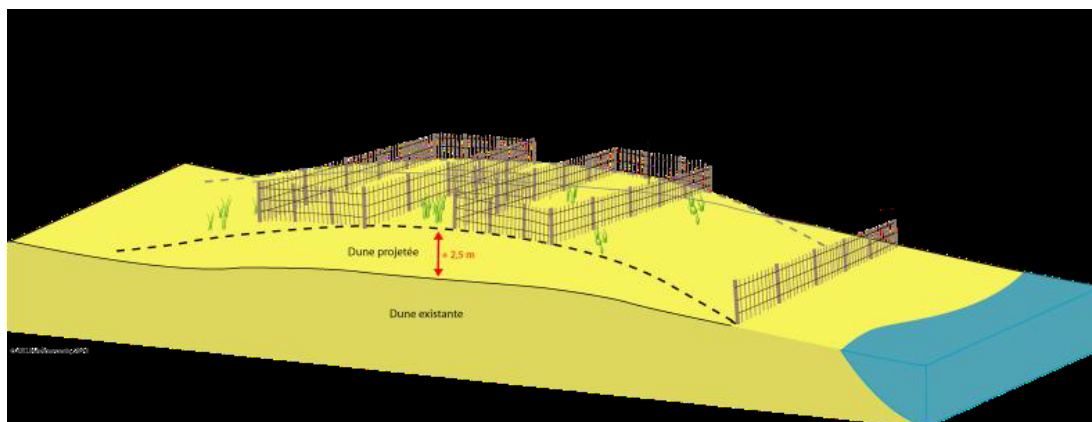


Illustration 44 : ouvrage à maille profilée avec bourrelet d'amorçage
(source : EID Med, 2013)

Une estimation de ces travaux est donnée par l'EID sous la forme d'un prix au mètre linéaire de ganivelles intégrant les travaux de talutage pour créer le bourrelet d'amorçage : 22 €/ml.

En considérant la mise en œuvre moyenne de cinq à huit rangs longitudinaux de ganivelles et en majorant ce nombre pour tenir compte de l'implantation transversale, un ratio de 10 ml de ganivelles par mètre linéaire de dune peut être retenu.

Pour la création d'un cordon dunaire avec cette technique d'amorçage, il en résulte un prix unitaire de 220 €/ml, valeur sensiblement inférieure à celle obtenue dans le cas d'un rechargement massif en sable.

7.2.2 Réhabilitation et confortement des cordons dunaires

De même que pour la création de cordons dunaires, le coût du confortement varie suivant les quantités de sable mobilisées et les techniques mises en œuvre. Parmi les opérations recensées, on peut distinguer :

- les opérations sur des dunes en front de mer. Elles mobilisent entre 20 et 50 m³/ml pour un coût variant entre 250 et 320 €/ml. Dans la mesure où ce type d'opération met en œuvre les mêmes techniques que celles utilisées pour la création d'un cordon dunaire mais en intervenant sur des ouvrages existants qu'il faut recharger, il est cohérent d'obtenir un coût de l'ordre de la moitié de celui observé dans la rubrique précédente ;
- une opération de restructuration d'une ancienne ligne de défense s'appuyant sur des cordons dunaires intérieurs (opération de restauration du massif dunaire de l'Espiguette). Ce projet présente l'intérêt d'utiliser les reliefs existants. De plus ce positionnement a le double avantage d'éviter une exposition à l'action des vagues tout en bénéficiant des apports du transport éolien. Le coût s'en trouve nettement diminué : 104 €/ml malgré un coût de mise en œuvre du sable élevé (14,5 €/m³) ;
- une intervention d'urgence : suite à Xynthia, pour un simple rechargement de sable prélevé sur la plage, à raison de 10 m³/ml, un coût de 70 €/ml est observé.

7.3 COÛTS DÉTAILLÉS DES TECHNIQUES

Cette section présente le coût détaillé des techniques suivantes :

- rechargement, remodelage, reprofilage de dunes ;
- végétalisation et couvertures ;
- brise-vent (ganivelles, filets en fibre de coco) et clôtures (fils lisses, grillage).

Pour cette dernière rubrique, les coûts d'entretien seront précisés.

7.3.1 Rechargement, remodelage, reprofilage de dunes

Suivant les considérations présentées dans la section 6.1 consacrée au rechargement de plage, le coût de ces interventions peut varier de 4 à 20 €/m³ en fonction des quantités concernées et des distances parcourues.

Pour certaines opérations particulières (du type de celles effectuées sur la côte méditerranéenne), des prélèvements pourront être effectués sur des sites éloignés à terre ou en mer. Dans ce cas, le coût volumique peut varier sur toute la fourchette indiquée. Par contre, pour les opérations régulières, telles que celles menées par l'ONF sur la façade atlantique (remodelages localisés ou reprofilage de dune), le sable est déplacé localement et la valeur de 4 €/m³ est une bonne approximation (lorsqu'il s'agit de multiples interventions espacées, les frais de déplacement peuvent conduire à revoir à la hausse cette estimation).

7.3.2 Végétalisation et couvertures

La végétalisation et les couvertures de sol dépendent du climat. Les dispositions adoptées ne sont pas les mêmes sur les littoraux atlantique et méditerranéen.

Sur le littoral atlantique :

Les techniques de plantation utilisées pour l'oyat et l'agropyron sont similaires : des prélèvements sont effectués à proximité (à quelques dizaines de mètres) des zones à replanter et les plants sont positionnés sur des lignes espacées de 0,8 m. L'espacement sur une ligne est de 0,8 m et les plants sont disposés en quinconce (dispositif le plus courant). Pour une nouvelle plantation, le coût est toujours de l'ordre de 0,5 €/m². Pour le « regarni » de plantations existantes, le coût peut atteindre 1 €/m².

Sur la base du rapport d'activité 2014 de l'ONF, il apparaît que les actions de couverture sont menées de façon conjointe avec l'entretien des forêts ou des landes adjacentes. Le coût des actions de couverture dépendra donc du type de terrain fournissant les matériaux de couverture et de la distance à laquelle ils se trouvent. Les plages de variation par type de matériau sont les suivantes :

- couvertures de houppiers de pin (ou de pins de dépressage) : coût compris entre 0,7 et 1,3 €/m² ;
- couvertures planes de genêts ou brande (terme désignant plus largement la végétation de la lande) : coût compris entre 0,6 et 0,7 €/m².

La couverture en houppiers de pin mobilise des moyens lourds de manutention et de transport. Son coût est supérieur à celui de la couverture en genêts qui mobilise des moyens plus légers. Par contre les interventions sont plus espacées dans le premier cas. Les coûts globaux associés aux deux méthodes peuvent donc être considérés comme sensiblement équivalents.

Sur le littoral méditerranéen :

Si l'on compare la situation de la façade méditerranéenne avec celle de la façade atlantique, il en ressort d'une part que les conditions climatiques sont moins favorables à la végétation et d'autre part que les conditions ne sont pas réunies pour l'utilisation de branchages en couverture d'une façon conjointe avec l'exploitation des forêts et des landes : les dunes ne bénéficient pas de la même proximité avec des terrains susceptibles de fournir des matériaux de couverture et de surcroît l'utilisation de branchages n'est pas appréciée sur des sites à vocation touristique.

Il en résulte que les coûts de végétalisation et de couverture observés sur la côte méditerranéenne sont très sensiblement supérieurs à ceux observés sur la côte atlantique.

Les coûts de la végétalisation sont donnés par l'exposé [EID, septembre 2013] :

- 5 €/m² avec prélèvement et semis in situ (ce coût est également observé sur Villeneuve-lès-Maguelone mais sur l'opération de restauration du massif dunaire de l'Espiguette (Le Grau-du-Roi, 30), le prix unitaire n'est que de 1 €/m², ce qui est sans doute lié à la proximité du lieu de prélèvement) ;
- 15 €/m² avec plants de pépinière. Ce travail est réalisé avec les pépiniéristes qui se chargent d'élever les végétaux pendant un an avant de les planter sur le cordon dunaire. Le taux de reprise des végétaux est de 50 à 60 %.

À ces coûts s'ajoute celui du dispositif destiné à maintenir des conditions de sol favorables aux plantations (prévention de l'érosion et maintien de l'humidité), le temps du développement de leur système racinaire. Ce système peut être composé :

- d'une couverture morte (géotextile biodégradable) : 5 €/m² (variable de 2,5 à 7,5 €/m²) ;
- ou d'un paillage (à base de roseaux par exemple) : de 5 à 10 €/m².

7.3.3 Ganivelles

Les ganivelles sont constituées de lattes de bois assemblées par du fil de fer galvanisé. Les lattes sont généralement réalisées en châtaignier, d'une section de 45 × 13 mm.

En diminuant la vitesse du vent qui les traverse, les ganivelles provoquent une chute du sable transporté par le vent et son stockage sur les dunes où elles sont implantées. Les ganivelles servent aussi à la délimitation des cheminements piétons et préservent ainsi la végétation du piétinement.

Selon la fonction et l'effet recherchés, il est nécessaire d'adapter la hauteur des lattes (de 0,5 à 2,0 m) et leur espacement (de 0,02 à 0,10 m). Le stockage du sable dépendra de la perméabilité des ganivelles. Cette perméabilité est définie par le pourcentage de vide dans le rideau (par exemple, des ganivelles de section 4 cm espacées de 6 cm ont une perméabilité de 60 %). L'illustration 45 présente en délimitation de dune des ganivelles de perméabilité élevée et formant des casiers sur la dune, des ganivelles de perméabilité plus faible.



Illustration 45 : ganivelles de perméabilité 60 et 80 %
(auteur : Hugues Heurtefeux, EID)

Il est aussi possible d'optimiser l'efficacité et la durabilité de la ganivelle en jouant sur le type de latte, sciée ou refendue et même sur le type de fil (torsadé ou lisse). Les lattes refendues présentent un taux de rugosité vis-à-vis du vent supérieur à celui des lattes sciées (cf. Illustration 12), ce qui augmente leur efficacité. Elles sont également plus résistantes dans le temps et présentent un aspect plus naturel. Enfin, le type de fil permet d'adapter la rigidité de la ganivelle. Le fil torsadé apporte de la souplesse tandis que le fil lisse rigidifie l'assemblage.



Illustration 46 : ganivelles avec lattes sciées
(source : Hugues Heurtefeux, EID)

Le choix du type de ganivelles résulte d'une longue expérimentation sur le terrain et on peut considérer à ce titre qu'il correspond à un optimum technico-économique. Dans la suite, nous étudions le coût linéaire des ganivelles utilisées pour le stockage du sable puis de celles utilisées pour la délimitation des cheminements piétons.

Les **ganivelles utilisées pour le stockage du sable** présentent les caractéristiques suivantes :

- les ganivelles de hauteur 0,5 m en lattes sciées sont utilisées par l'ONF sur les sites connaissant des mouvements de sable importants en Gironde. Leur ensablement est rapide (d'où le choix des lattes sciées) et un autre étage de ganivelles du même type est alors ajouté pour poursuivre l'accumulation de sable. Leur coût linéaire est de l'ordre de 7 €/ml ;
- les ganivelles de hauteurs supérieures (1,0 ou 1,2 m) en lattes refendues reliées par fils de fer torsadés et galvanisés sont utilisées par l'ONF et l'EID pour des sites à l'ensablement moins rapide. Le prix dépend de la perméabilité recherchée. D'après le bilan d'activité 2014 de l'ONF, l'exposé [EID, septembre 2013] et les prix observés dans les marchés, les coûts de fourniture et mise en œuvre sont :
 - pour une perméabilité de 80 %, de l'ordre de 12 €/ml ;
 - pour une perméabilité de 50 %, de l'ordre de 15 €/ml.

Les **ganivelles utilisées pour les clôtures de protection** ont une hauteur de 1,2 m et sont en général en lattes refendues pour une meilleure intégration dans le paysage et pour une meilleure durabilité. Elles peuvent être reliées par des fils lisses pour rigidifier la structure. Ces différences par rapport aux ganivelles utilisées pour le stockage de sable ne modifient pas sensiblement leur coût généralement compris entre 12 et 15 €/ml.

Pour des opérations ponctuelles, le coût de fourniture et de mise en œuvre peut augmenter jusqu'à des valeurs de l'ordre de 20 €/ml. Cette augmentation ne fait que traduire l'influence plus importante des frais fixes de déplacement sur le coût des interventions plus modestes.

Les ganivelles de 0,5 m étant destinées à un ensablement rapide, le coût d'entretien n'a de sens que pour les ganivelles de hauteur supérieure. Les coûts d'entretien observés sont compris entre 1,5 et 2,5 €/ml avec une valeur moyenne de 2 €/ml (valeurs calculées sur la base du rapport d'activité 2014 de l'ONF).

7.3.4 Brise-vent en fibre de coco

Les brise-vent en fibre de coco de hauteur 0,5 m sont utilisés par l'ONF sur le littoral aquitain. Ils sont utilisés en rideau brise-vent en alternative à des ganivelles de même hauteur notamment du fait de leur grande facilité de mise en place (matériels moins lourds), essentiellement dans des sites où ils seront ensablés dans les mois qui suivent leur installation. Leur coût est de l'ordre de 3,5 €/ml.

Étant destinés à un ensevelissement rapide, il n'est pas opportun de leur attribuer un coût d'entretien.

7.3.5 Clôtures

Deux types de clôtures sont recensées : les clôtures fils lisses (solution par défaut) et les clôtures grillagées (zones très fréquentées par le public).

Les clôtures « 3 fils » présentent des coûts relativement dispersés (entre 4 et 11 €), dispersion essentiellement liée à l'influence des frais fixes de déplacement variables en fonction des quantités posées. La valeur moyenne est à 7 €/ml. Les frais d'entretien sont également variables, entre 0,6 et 1,8 € avec une valeur moyenne de 1,2 €/ml (valeurs calculées sur la base du rapport d'activité 2014 de l'ONF).

Les clôtures grillagées présentent des coûts d'implantation sensiblement équivalents à ceux de la clôture fils lisses : valeurs comprises entre 6 et 11 €/ml avec une moyenne à 8 €/ml. Par contre, les interventions d'entretien sont plus coûteuses : valeurs comprises entre 1,5 et 3,3 €/ml avec une moyenne à 2 €/ml.

8. Coûts observés sur les systèmes d'endiguement (en particulier les digues)

La partie 5 a permis d'aborder le thème des dépenses consacrées à la protection contre les submersions marines en considérant l'ensemble des mesures structurelles à mettre en œuvre. Dans la plupart des cas, les digues constituent un poste de dépense important dans ce dispositif. Cette partie est destinée à apprécier plus précisément les coûts associés à ces ouvrages et les paramètres déterminant les variations de ces coûts.

La position des digues sur le littoral est singulière comparée à la position des autres structures en ce qui concerne les conditions hydrauliques auxquelles elles peuvent être exposées. Deux observations serviront de point de départ à nos analyses (section 8.1) :

- si les plages, dunes, ouvrages de génie civil (de type perré, épi, brise-lames...) sont toujours, de par leur fonction, positionnés en front de mer ou en bordure des estuaires, les digues peuvent avoir ce même positionnement ou être placées en retrait, c'est-à-dire à l'abri des vagues et des courants dans les conditions normales de fonctionnement du système d'endiguement. Or l'exposition aux vagues et aux courants a une forte influence sur le coût des digues en ce qu'elle peut imposer des mesures de protection des talus ;
- suivant les secteurs géographiques, les digues positionnées en front de mer peuvent être soumises à des conditions de marnage très contrastées. Or la plupart des opérations recensées pour lesquelles nous disposons de données de coûts ont été réalisées après Xynthia sur le littoral atlantique, littoral dont les conditions de marnage ne sont représentatives que d'une partie des côtes françaises. Il conviendra donc de s'assurer que les résultats obtenus peuvent être transposés sur les autres secteurs du littoral.

Ces réflexions préliminaires nous conduiront à distinguer la présentation du coût des digues exposées aux vagues (digues avec parement) de la présentation du coût des digues en terre situées sur des sites moins exposés et dont la surface est végétalisée (digues sans parement).

Dans chacun des cas, l'analyse des coûts sera menée en respectant le cadre déjà adopté pour les digues de protection contre les inondations fluviales [Cerema, 2014], à savoir que nous traiterons de façon distincte :

- du coût des interventions particulières d'investissement (construction reconstruction, réfection ou confortement) ou d'entretien (opérations régulières ou opérations de réparation suite à une tempête). Les valeurs recherchées sont les **coûts linéaires, éventuellement complétés en fonction des techniques par des coûts volumiques, surfaciques ou massiques**. Cette analyse (menée en section 8.2 pour les digues avec parement et en section 8.3 pour les digues sans parement) sera basée sur l'exploitation des données issues des marchés de travaux et des tableaux de suivi financier des PAPI. Dans le prolongement de cette analyse, nous apprécierons les parts que représentent dans le montage financier des opérations les études et les acquisitions foncières par rapport aux marchés de travaux (section 8.4) ;
- des coûts moyens annuels (section 8.5) qui peuvent être calculés sur des durées suffisamment longues en considérant un ensemble d'ouvrages potentiellement hétérogènes. Les valeurs recherchées sont les coûts linéaires annuels de gestion, d'entretien ou d'investissement. Nous rappelons que les définitions de ces coûts sont données en section 1.2. Dans le cas des digues côtières, le contexte actuel permet

d'évaluer des **coûts moyens annuels d'entretien et de gestion**. Par contre, la taille des parcs et l'évolution des exigences sur la sécurisation des ouvrages n'offrent pas des conditions favorables au calcul d'un coût moyen annuel d'investissement.

8.1 INFLUENCE DU MARNAGE ET DE L'EXPOSITION AUX VAGUES ET AUX COURANTS

La plupart des opérations sur lesquelles nous pouvons observer les coûts d'intervention sur les digues étant situées au centre de la façade atlantique (principalement entre les estuaires de la Gironde et de la Loire), il est nécessaire, pour pouvoir tirer des conclusions plus générales, de connaître l'influence sur les coûts que pourraient induire des conditions différentes, en particulier les deux paramètres déterminants que sont :

- les conditions de marnage ;
- l'exposition aux vagues et aux courants (en front de mer et en retrait).

Au centre de la façade atlantique, la côte est particulièrement ciselée et parsemée d'îles. Par ailleurs, il existe de nombreux marais côtiers comportant des digues en retrait du front de mer. On peut donc considérer que les conditions hydrauliques sont suffisamment variées pour que l'analyse puisse intégrer correctement l'influence de l'exposition aux vagues et aux courants sur les coûts. Il n'en va pas de même a priori de l'amplitude de la marée puisque le littoral sur lequel les opérations sont observées connaît, pour une marée de coefficient 95, un marnage de l'ordre de 5 m, alors que cette valeur varie entre 0,5 et 12 m sur le littoral français. Il convient donc de mieux apprécier le domaine de validité des estimations obtenues sur la base de l'échantillon disponible et de définir comment les résultats peuvent être extrapolés en dehors de ce domaine.

8.1.1 Influence du marnage sur le coût des digues

L'échantillon disponible des interventions sur lesquelles des données de coût ont été recueillies concerne des ouvrages quasi exclusivement situés sur le littoral couvrant le centre de la façade atlantique. Sur ce littoral, pour une marée de vives-eaux moyennes (coefficient 95), la variation de hauteur d'eau est comprise entre 4,5 et 5,5 m (cf. Illustration 47). Dans ces conditions nous observons que la hauteur des ouvrages est généralement comprise entre 1,0 et 4,0 m (hors fondations). Sur les points les plus exposés à la houle (opérations recensées sur les îles de Noirmoutier et d'Oléron), la hauteur peut atteindre 6 voire 7 m.

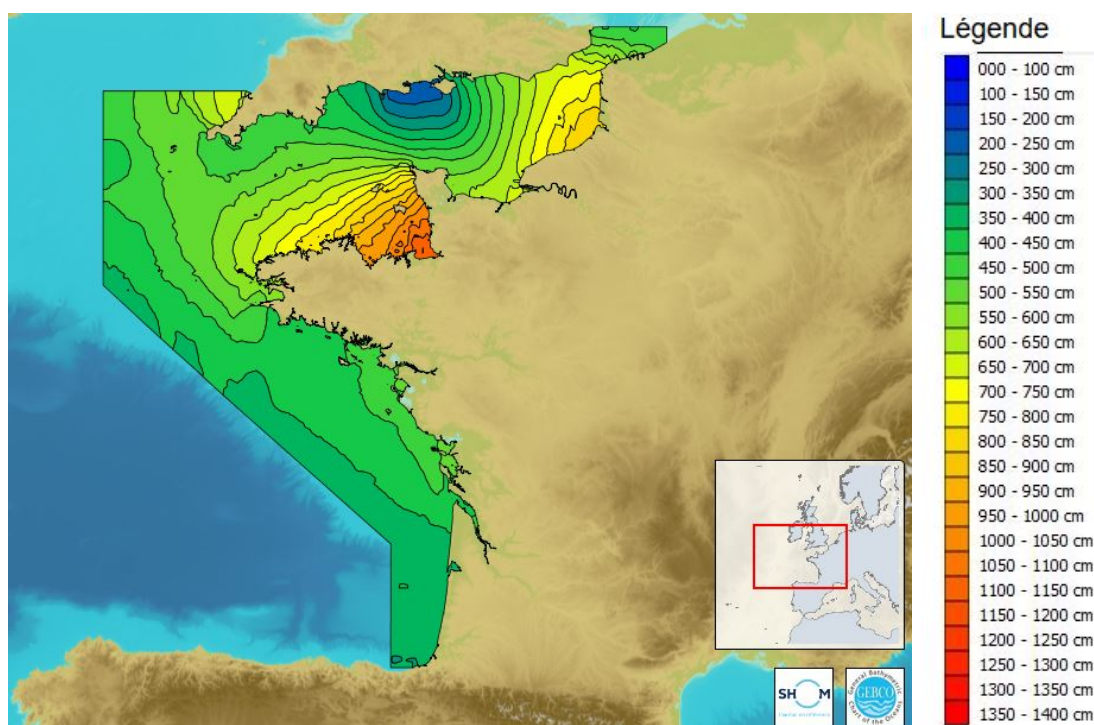


Illustration 47 : marnage sur les façades atlantique et Manche mer du nord pour un coefficient de 95
(source : data.shom.fr)

Dans la mesure où dans notre étude les coûts des ouvrages sont donnés en référence à des classes de hauteurs métriques, on peut raisonnablement considérer qu'une augmentation ou une diminution inférieure à un mètre par rapport à la plage de marnage 4,5-5,5 m d'une marée de coefficient 95 n'ont pas d'incidence majeure sur le dimensionnement et le coût des ouvrages. Sur la base de cette hypothèse, les coûts observés sur le littoral du centre de la façade atlantique peuvent être réputés également justes sur les littoraux dont l'amplitude de marée de vives-eaux moyennes est comprise entre 3,5 à 6,5 m, à savoir tout le littoral atlantique-Manche-mer du Nord, sauf :

- entre la pointe du Raz et le cap de la Hague (pour un coefficient de 95, le marnage dépasse 11,0 m en baie du Mont Saint-Michel) ;
- entre l'estuaire de la Seine et le cap Gris Nez (pour un coefficient de 95, le marnage dépasse 8,0 m sur le littoral normand-picard).

Pour mieux apprécier comment les dimensions des digues évoluent dans le cas de fortes amplitudes de marée, considérons le parc d'ouvrages côtiers de la Manche sur lequel la DDTM a réalisé en 2010 et 2011 une série d'inspections. Le littoral de ce département présente l'intérêt de comporter de nombreuses digues réparties sur sa face ouest dont le marnage varie entre 6,0 et 11,5 m, et sur sa face est dont le marnage varie entre 5,0 m et 6,0 m.

En considérant les 52 profils dressés en restitution de ces investigations, les valeurs minimum, moyennes et maximum relevées côté eau et côté terre sont les suivantes :

	Hauteur côté terre	Hauteur côté eau
valeur minimum	0,5	0,7
valeur moyenne	1,7	2,1
valeur maximum	5,0	6,0

Hormis quelques rares cas de digues pour lesquelles la hauteur côté terre peut dépasser 3,0 m (un seul cas sur le département de la Manche), la hauteur mesurée côté terre des digues est comprise entre 1,0 et 3,0 m, et ce quel que soit le marnage. Les hauteurs côté eau sont légèrement supérieures (hauteur de 6 m enregistrée sur le département de la Manche).

Lorsque la hauteur côté terre dépasse 3,0 m, cela s'explique en général par un enjeu particulier ou par des conditions de réalisation particulièrement favorables :

- digue supportant une voirie (cas d'une digue de hauteur 5 m en baie du Mont Saint-Michel) ;
- digue protégeant un très grand polder (cas de la digue du Génie de hauteur 5 m, à l'Aiguillon-sur-Mer – cf. Illustration 48) ;
- digues abritées dont la construction est facilitée par le prélèvement sur place de matériaux (cas des digues du bassin d'Arcachon dont la hauteur moyenne est de l'ordre de 3,5 m [Barcasub, juillet 2013]).



Illustration 48 : une digue de grande hauteur : la digue du Génie à l'Aiguillon-sur-Mer
(auteur : Marc Igigabel)

En conclusion :

Bien que la plupart des opérations recensées dans notre étude concernent le littoral centre atlantique dont le marnage est modéré, les dimensions des ouvrages objet de ces opérations peuvent néanmoins être considérées comme représentatives des ouvrages présents sur le littoral français. Précisons toutefois que dans certaines configurations et sans que cela soit systématique, un fort marnage peut conduire à augmenter la hauteur du talus côté eau.

L'illustration 49 et l'illustration 50 mettent en regard le cas où les deux talus ont la même hauteur et le cas où le talus côté eau se prolonge sur un estran dont la position altimétrique est basse.

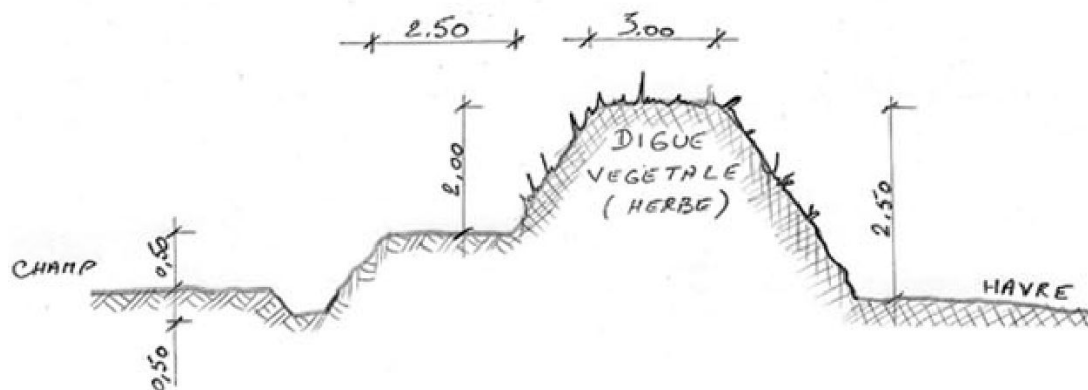


Illustration 49 : digue en terre avec deux talus de hauteur équivalente
(source : DDTM50)

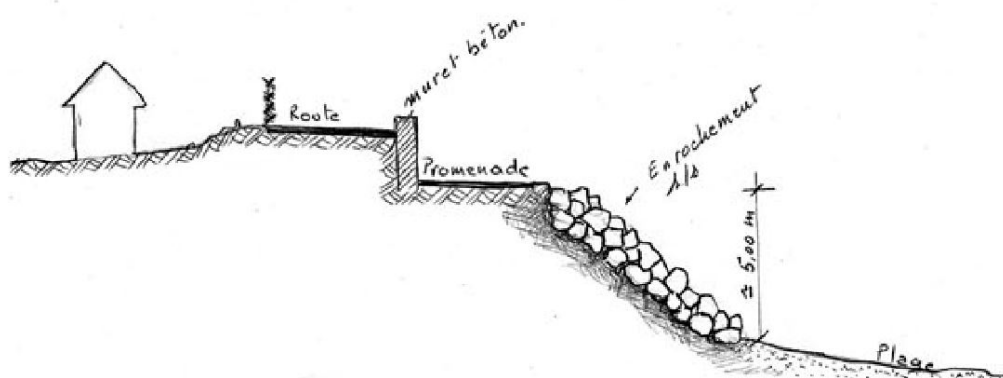


Illustration 50 : digue avec parement de hauteur supérieure côté mer
(source : DDTM50)

Dans le second cas, s'il est nécessaire de protéger le talus par un parement, l'estimation du coût de la digue doit être ajustée. Cet ajustement peut être effectué en additionnant au coût d'une digue sans parement le coût d'un perré, en tenant compte à chaque fois des classes de hauteur et des types de matériaux (dans le cas où la hauteur côté terre est très faible par rapport à la hauteur côté mer, le coût global sera proche de celui du perré).

Ajoutons enfin que sur la façade méditerranéenne, où le marnage est significativement plus faible, compris entre 0,20 et 0,50 m [MEEDDM, 2010], aucune raison particulière n'apparaît justifier des dimensions différentes de celles des digues sur lesquelles s'est basée notre étude. Les coûts établis y sont donc réputés valables.

8.1.2 Influence de l'exposition aux vagues et aux courants sur le coût des digues

Les digues côtières et les ouvrages hydrauliques associés ont la particularité de pouvoir être positionnés soit sur le trait de côte, soit à l'intérieur des terres. Il en résulte que leur niveau d'exposition aux vagues peut varier très sensiblement, ce qui influe sur :

- les coûts de construction par la composition des ouvrages, notamment la nature de la protection extérieure ;
- les coûts d'entretien et de gestion par les désordres subis (tant leurs types que leurs occurrences).

8.1.2.1 Influence de l'exposition aux vagues sur les coûts de construction

Les dispositions constructives sont adaptées en fonction de l'agressivité du milieu et notamment de l'exposition aux vagues. Ainsi :

- sur les zones abritées (comme c'est le cas à l'intérieur des marais), les digues sont en général constituées d'un remblai. Les matériaux ont souvent été prélevés à moindre coût sur place, notamment en creusant les fossés ;
- sur les zones exposées, les digues sont également composées de remblais mais un parement (maçonnerie, enrochement, béton...) protège les parties exposées. Ces protections extérieures constituées de matériaux d'apport augmentent très sensiblement le coût de construction.

La même distinction existe sur les ouvrages hydrauliques qui ponctuent les linéaires de digues : les coûts de construction sont supérieurs dès lors qu'est requise une protection contre les vagues.

Pour apprécier la proportion des digues revêtues d'un parement dans un parc d'ouvrages, l'exemple du littoral de la Manche peut être repris. Il donne un éclairage, à l'échelle d'un département comportant une grande variété d'expositions, des choix qui se sont imposés dans ce domaine. Sur les 52 profils dressés par la DDTM, la répartition sur le talus côté eau est la suivante :

	Nombre	Pourcentage
Végétation	32,0	62%
Maçonnerie	12,0	23%
Enrochements	7,0	13%
Béton	1,0	2%
Total	52,0	100%

Il apparaît que dans cet exemple la conception majoritaire est « sans parement ». Le pourcentage de digues revêtues d'un parement en maçonnerie (23 %) atteste d'une protection ancienne prédominante par rapport à des protections plus récentes en enrochements (13 %) ou en béton (2 %). Dans le cas du littoral du centre de la façade atlantique qui a été touché par Xynthia, la plupart des opérations en front de mer consistent à réaliser une protection en enrochements sur des digues qui étaient auparavant, soit dépourvues de parement, soit pourvues d'un parement en maçonnerie ou en béton.

8.1.2.2 Influence de l'exposition aux vagues sur les coûts d'entretien et de gestion

Les types de désordres et leurs occurrences sont également bien distincts selon le niveau d'exposition aux vagues :

- sur les zones faiblement exposées, s'agissant de digues en terre sans parement, le développement de la végétation et la colonisation éventuelle par des animaux fouisseurs obligent à des interventions régulières, sur un rythme annuel pour assurer l'entretien courant. À ces interventions régulières s'ajoutent les interventions de réparation pour répondre aux phénomènes d'érosion qui se développent au cours du temps (affouillements en pied, ornières en crête...) ou pour répondre aux événements exceptionnels qui peuvent provoquer des désordres caractéristiques de niveaux d'eau inhabituels (érosion par surverse, instabilité... conduisant potentiellement à des brèches) ;
- sur les zones exposées aux vagues, s'agissant des digues revêtues d'une carapace, tout comme les autres ouvrages « en dur », les interventions sont moins régulières mais plus lourdes du fait du matériel et des matériaux à mobiliser. Lorsque la carapace est constituée d'enrochements, les matériaux pourront dans le cas général être réutilisés. Lorsque les parements sont en maçonnerie ou en béton, si l'état de dégradation est trop avancé, la réutilisation des matériaux en parement n'est en général pas envisagée (pour des raisons économiques ou de faisabilité), ce qui implique, en cas de réparation ou de confortement, de réapprovisionner le chantier en matériaux d'apport tout en évacuant les matériaux de l'ancien parement.

Il résulte de ces considérations que les notions de coût annuel d'entretien et de coût annuel de gestion s'appliquent plus naturellement au cas des digues non revêtues de parement et situées à terre qu'aux ouvrages protégés par un parement en béton ou en enrochements sur lesquels la fréquence d'intervention dépend plus directement de l'occurrence des tempêtes.

Notons que le cas des digues disposant d'un revêtement en maçonnerie s'apparente en matière de fréquence d'entretien davantage au cas des digues en terre qu'à celui des digues pourvues d'un parement. En effet, des opérations régulières de rejointoiement ou de comblement des vides sont nécessaires pour assurer la bonne tenue de l'ouvrage lorsque survient un épisode de tempête. Les parements maçonnés présentent donc des coûts élevés, tant en construction qu'en gestion et en entretien. La valeur patrimoniale des ouvrages peut néanmoins justifier leur maintien. Pour des raisons d'insertion paysagère, la construction d'ouvrages de ce type peut également être préférée.

8.2 COÛTS OBSERVÉS SUR LES DIGUES AVEC PAREMENT

Qu'il s'agisse de construire, de reconstruire, de conforter, de réparer ou d'entretenir, il ressort des réflexions préliminaires que les cas de digues avec et sans parement appellent un traitement différencié. La présente section est consacrée à l'étude du coût des opérations particulières sur les digues avec parement. La section 8.3 sera consacrée aux digues sans parement.

Ces coûts seront évalués en exploitant des marchés de travaux et des tableaux de suivi financier des PAPI et en rapportant les montants globaux à la longueur d'ouvrage concernée. Selon les techniques, des évaluations de coûts volumiques, surfaciques, linéaires ou massiques seront également produites.

Nous aborderons successivement les opérations de « construction, reconstruction ou réfection », de « confortement » et de « réparation ou entretien ». À chaque fois, un tableau de synthèse met en relation les coûts observés sur les différents modes d'intervention en précisant la hauteur des ouvrages. Puis chaque mode d'intervention fait l'objet d'une présentation distincte.

Les coûts linéaires correspondent aux coûts globaux tandis que les coûts surfaciques, volumiques et massiques se rapportent aux matériaux et aux techniques.

Tous les prix sont exprimés en euros et hors taxes. Le mois de référence est octobre 2014.

8.2.1 Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection

Digues avec parement – Travaux de construction, reconstruction, réfection					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Terrassement et enrochements	2	2000<2500<3100 (hauteurs de 2 à 3 m)	NA	19<32<45 (terrassement)	17<21<24 (enrochements)
Enrochements et superstructure en béton	2	5600<5800<6000 (hauteurs de l'ordre de 8 m dont 1 à 2 m de butée de pied)	NA	NA	29<31<33 (enrochements)
Maçonnerie et injection de béton	2	1400<2300<3200 (hauteurs de 2 à 3,5 m)	160<200<230 (maçonnerie)	580 (injection de béton et ancrage)	NA
Terrassement, matelas de gabions en drain interne et gabions en soutènement	1	1500 (hauteur de 2 m)	NA	NA	NA
Béton armé sur remblais avec refends en palplanches	1	14300 (hauteur de 8 m)	NA	NA	NA

Lorsque les interventions concernent un ouvrage existant (ce qui est presque toujours le cas), elles peuvent intégrer un rehaussement, en général d'une hauteur inférieure à 1 m.

Ci-après nous présentons pour chacun des modes d'intervention le coût linéaire global et les coûts associés à la mise en œuvre des techniques particulières.

8.2.1.1 Terrassement et enrochements

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Terrassement et enrochements	2	2000<2500<3100 (hauteurs de 2 à 3 m)	Les deux opérations ont été réalisées sur Ré et Oléron dans les mois suivant Xynthia sur une longueur de l'ordre de 100 m.

La hauteur des ouvrages est ordinaire, les techniques d'intervention classiques, pourtant le coût linéaire demeure relativement élevé. Les quantités importantes de matériaux importés constituent le facteur déterminant principal.

Terrassement :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m³)	Observations
Terrassement	2	volume déplacé (m³)	19<32<45	La constitution de rampes explique le coût élevé des terrassements sur une opération.

Enrochements :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	2	masse mise en œuvre (t)	17<21<24	

La reprise d'une partie des enrochements sur les sites (jusqu'à la moitié dans un cas) explique le coût unitaire modéré.

8.2.1.2 Enrochements et superstructure en béton

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Enrochements et superstructure en béton	2	5600<5800<6000 (hauteurs de l'ordre de 8 m dont 1 à 2 m de butée de pied)	Digues de Sangatte (2400 m) et de Saint-Clément-des-Baleines (1600 m). Fortes sollicitations hydrodynamiques sur ces ouvrages.

Les deux marchés de travaux étudiés concernent des opérations majeures et présentent certaines similitudes sur le plan technique et sur le plan des dimensions (cf. Illustration 51 et Illustration 52). Toutefois, l'opération de Saint-Clément-les-Baleines donne une part nettement plus importante au béton par la construction d'un mur en L d'une hauteur d'environ 4 m, tandis que l'opération de Sangatte n'utilise le béton que pour la construction d'une plate-forme en tête de structure, dont la largeur est de 4 m mais dont la hauteur est faible (hauteur maximale de 1 m). La quantité d'enrochements utilisés pour la digue de Sangatte est à l'inverse nettement supérieure : 145 t/ml contre 54 t/ml pour l'opération de Saint-Clément-les-Baleines.

Les coûts globaux sont très proches. Comme présenté ci-après, les coûts unitaires observés sur les enrochements contribuent à cette proximité des coûts linéaires moyens.

Enrochements :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	2	masse mise en œuvre (t)	29<31<33	Coût correspondant à la livraison fourniture et pose de matériaux d'apport.

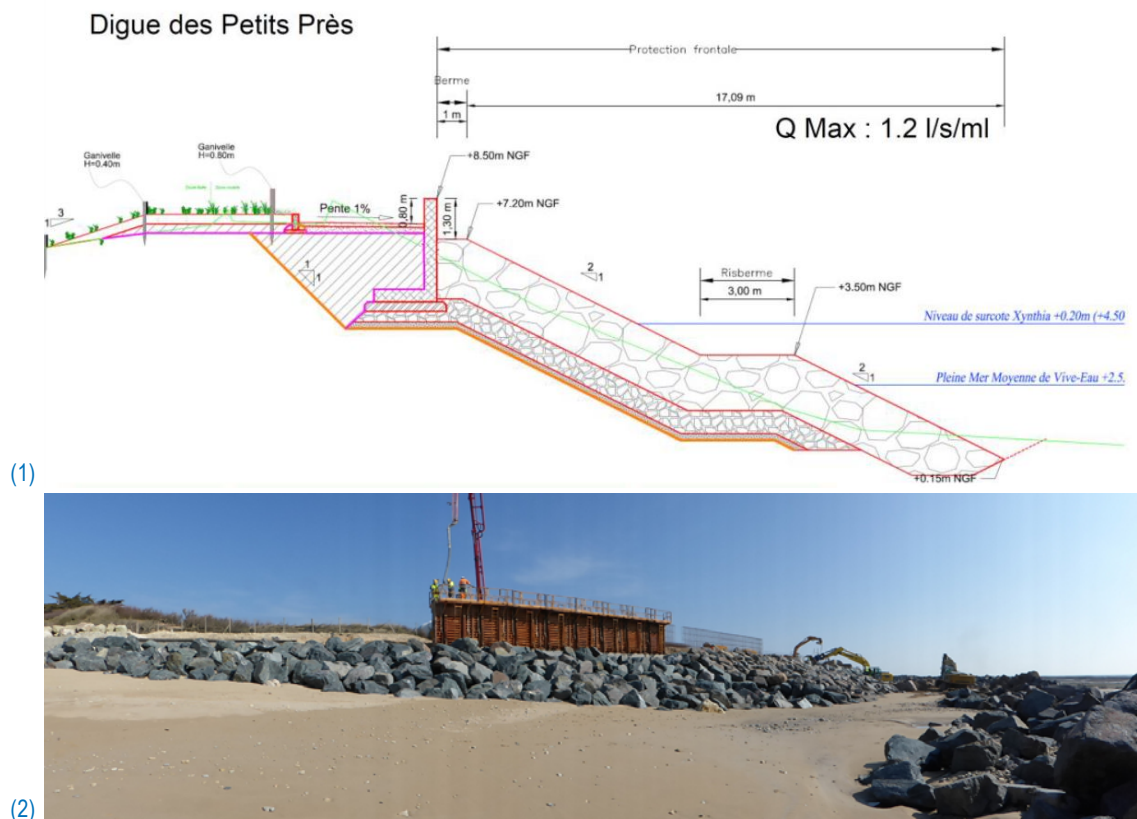


Illustration 51 : coupe-type (1) et vue du chantier de reconstruction de la digue de Saint-Clément-les-Baleines (2)
(source : CD17)

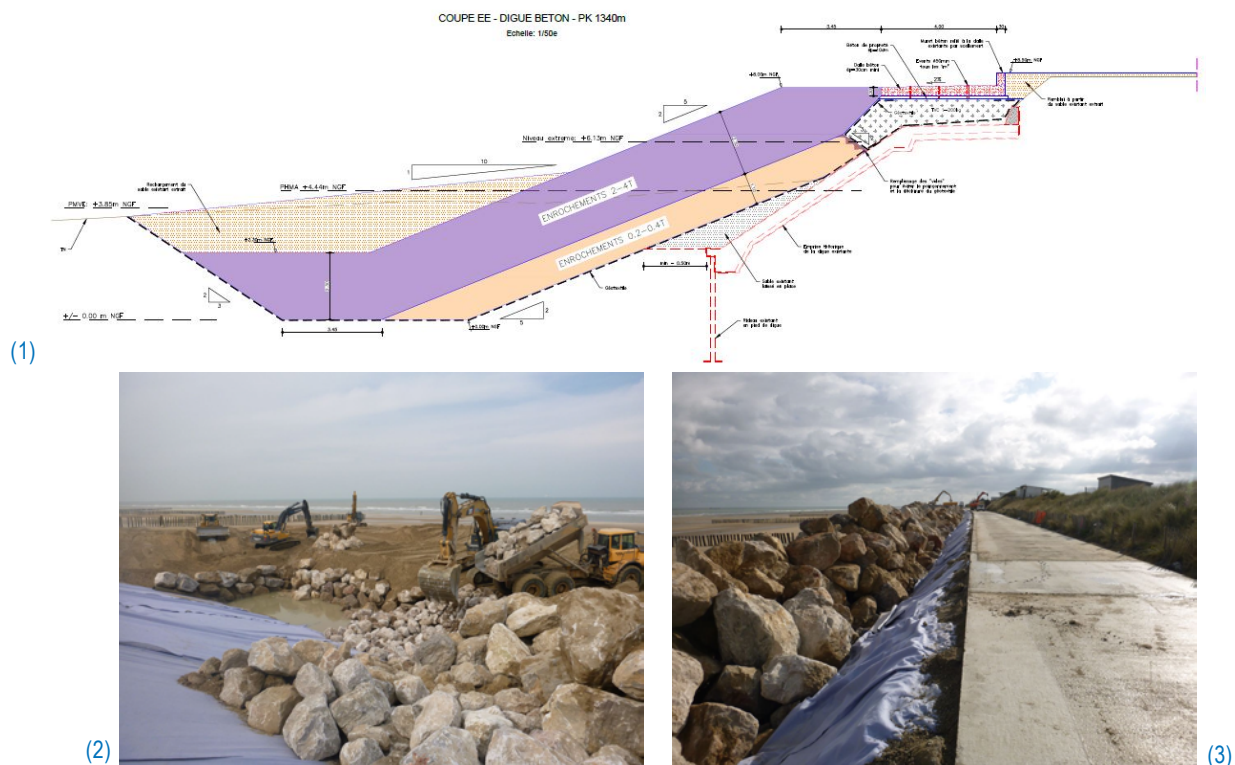


Illustration 52 : coupe-type (1) et vues du chantier de reconstruction de la digue de Sangatte (la butée de pied (2), et la plateforme de couronnement (3))
(auteur : DDTM62)

8.2.1.3 Maçonnerie et injection de béton

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Maçonnerie et injection de béton	2	1400<2300<3200 (hauteurs de 2 à 3,5 m)	Les deux opérations ont été réalisées sur Oléron dans les mois suivant Xynthia sur une longueur de l'ordre de 100 m.

Les deux opérations présentent des travaux de maçonnerie (fourniture et mise en œuvre de moellons, rejointoiement) dans des proportions différentes :

- 30 % de maçonnerie et 50 % d'injection de béton pour l'opération de Château- d'Oléron ;
- 75 % de maçonnerie pour l'opération de Saint-Georges-d'Oléron.

En complément du coût surfacique des maçonneries, le coût volumique de l'injection de béton a également été enregistré.

Maçonnerie :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût surfacique (€/m²)	Observations
Maçonnerie	2	surface maçonnée (m²)	160<200<230	

Injection de béton :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m³)	Observations
injection de béton	1	volume de béton (m³)	580	Ce coût inclut les aciers pour les ancrages (la moitié du prix du béton).

8.2.1.4 Terrassement, matelas de gabions en drain interne et gabions en soutènement

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Terrassement, matelas de gabions en drain interne et gabions en soutènement	1	1500 (hauteur de 2 m)	Digues d'étier sur le Pouliguen

L'utilisation de gabions, en « pavé » et en « matelas » n'apparaît que sur une seule opération, pour assurer un soutènement et gérer les écoulements internes (lesquels sont plus susceptibles de survenir sur des digues d'estuaires ou digues d'étier que sur les digues de front de mer qui ne sont mises en charge qu'à marée haute). L'illustration 53 présente une coupe-type et une vue du chantier.

En complément du coût linéaire global, le coût linéaire associé à la mise en œuvre des gabions a été établi. Il apparaît qu'il représente un coût légèrement supérieur à celui des terrassements.

Matelas de gabions en drain interne, et gabions en soutènement :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût linéaire (€/m)	Observations
Matelas de gabions en drain interne et gabions en soutènement	1	linéaire de digue pourvu de gabions (m)	800	

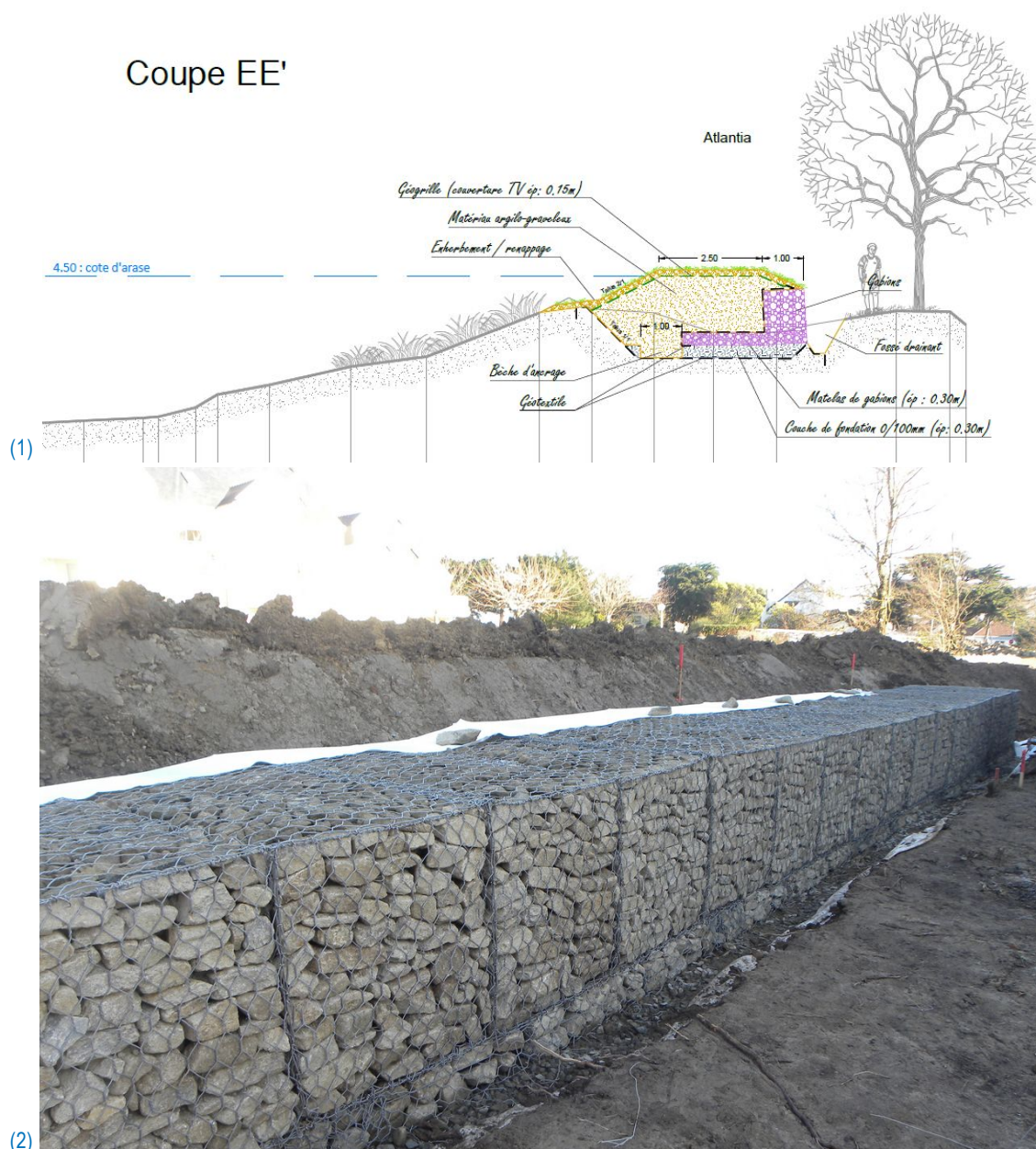


Illustration 53 : digue d'évier du Pouliguen - Coupe-type (1) (plan établi par Artelia) et vue du chantier (2) (photo : Marc Igigabel)

8.2.1.5 Béton armé sur remblais avec refends en palplanches

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Béton armé sur remblais avec refends en palplanches	1	14300 (hauteur de 8 m)	Digue du Boutillon sur l'île de Ré. Fortes sollicitations hydrodynamiques sur cet ouvrage.

La digue du Boutillon sur l'île de Ré est un ouvrage atypique. Pour une meilleure insertion dans le site, son parement côté mer présente un aspect de maçonnerie traditionnelle et son parement côté terre a été végétalisé. Il s'agit pourtant d'un ouvrage de génie civil dont la structure est composée une « coque en béton armé » s'appuyant sur des rideaux de palplanches longitudinales et transversaux (cf. Illustration 54). Son coût linéaire dépasse très largement (d'un facteur 2) celui des autres ouvrages de taille comparable.

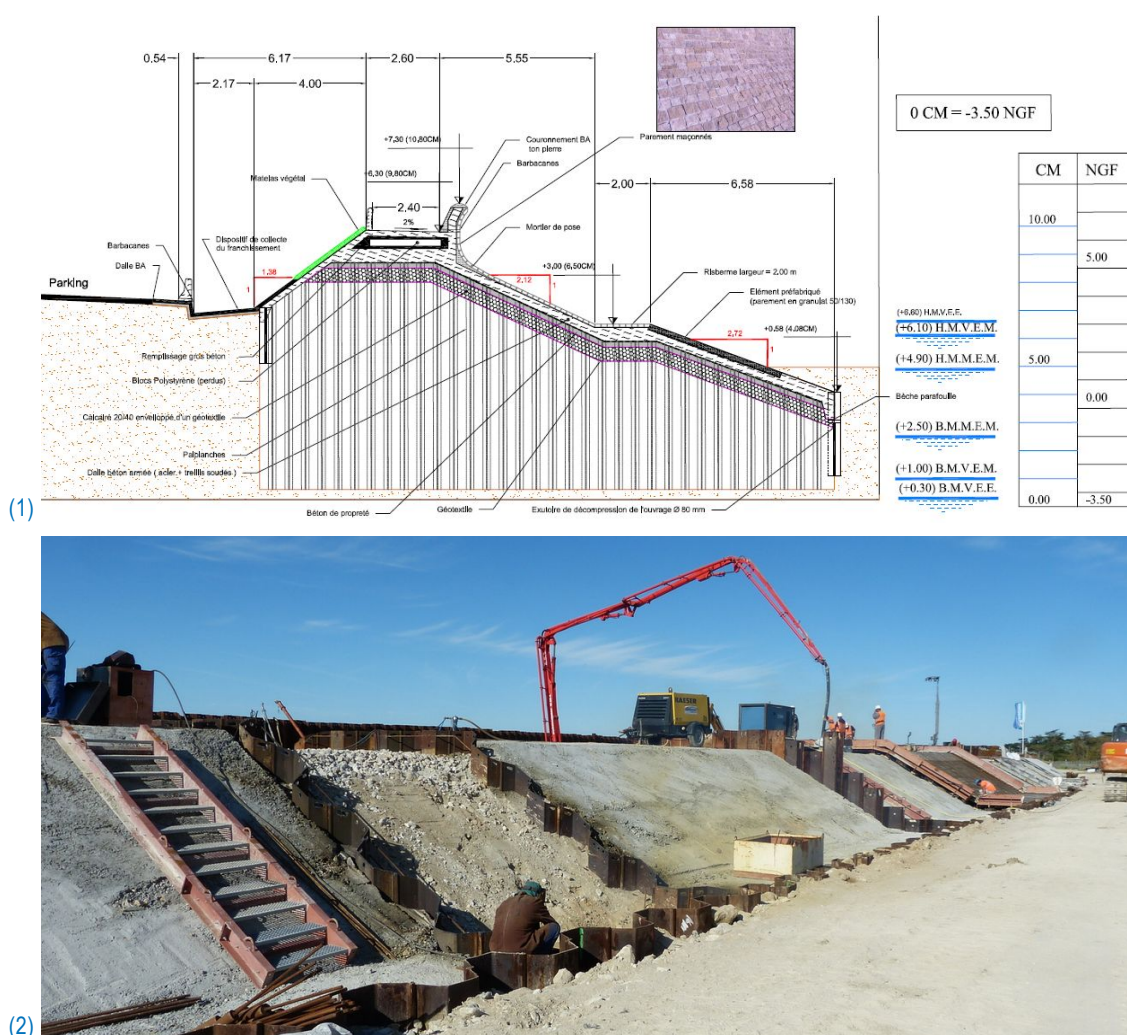


Illustration 54 : digue du Boutillon - Coupe-type (1)
(source : CD17)
et vue du chantier (2)
(photo : <http://www.notre-ile-de-re.com>)

8.2.2 Coûts observés sur les opérations de confortement

Digues avec parement – Travaux de confortement					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Terrassement et enrochements – reprise générale du profil	3	840<1100<1400 (hauteurs de 3,5 à 5 m)	NA	NA	39 (enrochements)
Terrassement et enrochements – rehausse	3	250<275<310 (hauteurs variables de 2 à 7 m)			
Terrassement et béton	2	1500<1750<2000 (hauteurs de 3 à 5 m)	NA	6 (terrassement)	29 (enrochements)
Enrochements et mur en béton	1	900 (hauteur de 3m)	NA	NA	29<30<31 (enrochements)
	2	1300<2100<2900 (hauteurs de 4 à 6 m)			
	1	6000 (hauteur de 8 m)			
Tunage et protection végétale	1	710 (hauteur de 3 m)	NA	NA	NA

De même que pour les opérations de réhabilitation, les opérations de confortement peuvent intégrer un rehaussement, en général d'une hauteur inférieure à 1 m. Pour une meilleure précision, nous avons distingué le cas des opérations conduisant à une rehausse du profil sans reprise généralisée de celui-ci. Ce cas apparaît principalement dans la présente section avec l'utilisation des enrochements en parement (le rehaussement avec le matériau béton existe aussi mais sera essentiellement traité dans la section 9.2 dédiée aux murs et ouvrages de soutènement).

8.2.2.1 Terrassement et enrochements – reprise générale du profil

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Terrassement et enrochements – reprise générale du profil	3	840<1100<1400 (hauteurs de 3,5 à 5 m)	Les sollicitations hydrodynamiques sur ces ouvrages sont relativement faibles.

Le coût de ces opérations est relativement proche et croît avec la hauteur des ouvrages. L'illustration 55 présente un exemple de réalisation sur le site de Loix (île de Ré).

Enrochements :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	1	masse mise en œuvre (t)	39	Opération de reprofilage de la digue des Saintes-Maries-de-la-Mer



Illustration 55 : renforcement des digues de Loix
(source : CD17 – auteur : J. Garnier)

8.2.2.2 Terrassement et enrochements – rehausse

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Terrassement et enrochements – rehausse	3	250<275<310 (hauteurs variables de 2 à 7 m)	Opérations de Géfosse-Fontenay (14) et de Barbâtre (85). L'opération de Géfosse Fontenay (14) a fait l'objet d'un découpage en 7 secteurs. De fortes variations sont observées suivant les secteurs.

Les digues disposant d'un parement en enrochements côté mer et d'un espace suffisant côté terre peuvent faire l'objet d'un rehaussement, par exemple selon les dispositions adoptées sur la digue de Sébastopol (île de Noirmoutier) telle que présenté en Illustration 56. Pour la rehausse de cette digue, les arbres ont fait l'objet d'une replantation hors zone d'influence de la digue.

Les coûts enregistrés en terrassement et enrochements sur l'opération de Géfosse-Fontenay (14) ne révèlent pas de difficultés particulières pour ce type de travaux.

Terrassement :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m³)	Observations
Terrassement	1	volume déplacé (m³)	6	Opération de Géfosse-Fontenay (14)

Enrochements :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	1	masse mise en œuvre (t)	29	Opération de Géfosse-Fontenay (14)

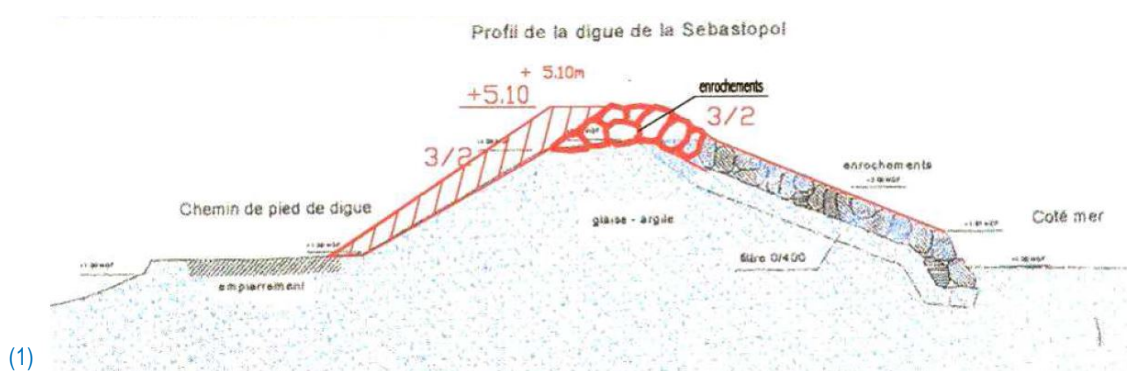


Illustration 56 : coupe-type (1) des travaux de rehaussement engagés sur la digue de Sébastopol (2)
(source : CCIN)

8.2.2.3 Terrassement et béton

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Terrassement et béton	2	1500<1750<2000 (hauteurs de 3 à 5 m)	Opérations en baie de Bourgneuf. Dallages béton sur remblai avec dans un cas un déflecteur en parapet.

Les deux opérations recensées portent sur des longueurs très différentes :

- l'une sur 20 m vise à la protection d'un passage surélevé en haut de cale. Son coût linéaire est de 2 000 €/ml ;
- l'autre sur 4 000 m vise le confortement d'une digue de front de mer. Son coût est de 1 500 €/ml.

Un exemple de ce type d'ouvrage, en baie de Bourgneuf, est présenté en Illustration 57. Sa réhabilitation est programmée en 2018.



Illustration 57 : digue du Dain à Bouin (85)
(auteur : Challans Gois Communauté)

8.2.2.4 Enrochements et mur en béton

Ces interventions ont été classées selon la hauteur des ouvrages pour en préciser les coûts.

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Enrochements et mur en béton	1	900 (hauteur de 3m)	Digue du Bouclard (île de Noirmoutier).
	2	1300<2100<2900 (hauteurs de 4 à 6 m)	Digues de Barbâtre et du front de mer des Boucholeurs
	1	6000 (hauteur de 8 m)	Digue de Sangatte

La digue de Sangatte (62) présente la hauteur la plus élevée, notamment du fait de sa position en zone de fort marnage.

Une hauteur importante peut aussi être justifiée (cas de la digue du front de mer des Boucholeurs mais également de celle de Sangatte) par l'exposition des digues à l'action des vagues (accroissement de la hauteur pour limiter les franchissements). Il en découle, sur les opérations recensées, que les ouvrages les plus hauts sont aussi ceux dont l'épaisseur d'enrochements est la plus importante, ce qui concourt à une forte augmentation des coûts avec la hauteur.

L'accroissement des coûts en fonction de la hauteur est donc principalement lié à la quantité d'enrochements constituant le parement. Les valeurs observées sur le coût massique des enrochements et sur le coût linéaire des structures en béton sont relativement stables comme indiqué ci-après.

Enrochements :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	2	masse mise en œuvre (t)	29<30<31	Opérations du front de mer des Boucholeurs et de Sangatte

Structure en béton armé :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût linéaire (€/m)	Observations
Structure en béton armé	2	linéaire de mur en béton armé (m)	1700<1800<1850	Opérations du front de mer des Boucholeurs et de Sangatte

Les structures en béton peuvent être utilisées pour former soit une plate-forme soit un muret.

La réalisation d'un muret implique normalement l'ouverture d'une tranchée pour ses fondations (cf. Illustration 58). Le coût observé dans cette rubrique sur le muret profondément ancré rejoint ceux observés dans la section 9.2.1.2 consacrée à la réalisation de ce type de muret de façon isolée (sans autre intervention sur une digue).



Illustration 58 : renforcement de la digue du Bouclard sur l'île de Noirmoutier : ouverture de tranchée (1) et construction du muret (2) (source : CCIN)

8.2.2.5 Tunage et protection végétale

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Tunage et protection végétale	1	710 (hauteur de 3m)	Digue abritée de Saint-Gilles-Croix-de-Vie

Ces techniques peuvent être utilisées sur les sites faiblement exposés, tel que sur le site de Saint-Gilles-Croix-de-Vie (cf. Illustration 59). Il s'agit de mettre en place des pieux en pied de talus et de couvrir le talus d'un géotextile biodégradable en cordelette de coco. Ce tapis anti-érosif constitue une protection temporaire en attendant le développement de la végétation (couverture de 40 à 70 % du sol). On peut facilement planter au travers des hélrophytes (plantes semi-aquatiques).

Le programme [Barcasub, juillet 2013] mentionne également ce type d'intervention au niveau des polders bordant le bassin d'Arcachon (polder de Certes et Graveyron (33)). D'après le Conseil départemental de Gironde, sur des digues de hauteur 3 m, le coût d'une telle opération de confortement est compris entre 600 et 900 € HT « si la terre peut être prélevée à proximité (par exemple dans les polders) ».



Illustration 59 : quai Gorin à Saint-Gilles-Croix-de-Vie (85) - Tunage et protection végétale
(source : DDTM85)

8.2.3 Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation

Digues avec parement – Travaux d'entretien ou réparation					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Terrassement et enrochements – Travaux « en continu »	3	420<460<540 (hauteurs de 2 à 3 m)	NA	14<24<31 (terrassement)	13<21<26 (enrochements)
Terrassement et enrochements – Travaux ponctuels	8	20<100<250 (hauteurs de 1 à 4 m)	NA	12<30<46 (terrassement)	14<19<24 (enrochements)
Reprise de maçonnerie	1	1100 (hauteurs de 2 à 3 m)	170	NA	NA
Pose de gabions	2	100<120<140 (hauteurs de 0,70 à 1 m)	140<150<160 (parement gabion)	NA	NA
Béton sur parement maçonné	1	470 (hauteur de 2 m)	110 (parement béton)	310 (béton)	NA
Béton sur enrochements (colmatage de brèches)	1	620 (hauteur de 5 m)	740 (parement béton)	450 (béton)	NA

La grande majorité des interventions étudiées dans cette section sont des opérations de réparation réalisées en particulier après la tempête Xynthia. Elles consistent principalement en des terrassements et en la pose d'enrochements. Dans notre analyse, nous distinguerons les cas où ces interventions sont menées « en continu » sur les ouvrages, de ceux où sont entreprises des interventions ponctuelles de réparation. En rapportant les dépenses à des linéaires d'ouvrage, les interventions en continu présentent naturellement des valeurs supérieures.

Nous étudierons également des opérations un peu plus marginales mais dont on peut quand même tirer certains enseignements : reprise de maçonnerie, pose de gabions, béton sur parement maçonné ou sur enrochements.

Considérées globalement, les opérations d'urgence post-Xynthia recensées dans cette section (réparation sur les digues avec parement) présentent un coût total de 1,66 M€ pour un linéaire de 12,6 km, soit un coût linéaire moyen légèrement supérieur à 130 k€/km, ce qui n'est pas très éloigné du coût linéaire global de 160 k€/km (calculé sur tous types d'ouvrages) qui ressort du bilan dressé à la suite de cette tempête (cf. section 5.1.2).

8.2.3.1 Terrassement et enrochements – Travaux « en continu »

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Terrassement et enrochements – Travaux « en continu »	3	420<460<540 (hauteurs de 2 à 3 m)	Interventions d'urgence post-Xynthia.

Ces opérations intègrent en plus des terrassements et des enrochements des interventions ponctuelles de ré-ensablement et de réparation d'épis. L'objectif de rétablir par des « interventions combinées » un niveau de protection suffisant explique que le coût linéaire observé soit relativement élevé, notamment si on le compare au coût linéaire observé sur les opérations de rehausse présentées dans la section précédente.

Terrassement :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m³)	Observations
Terrassement	3	volume déplacé (<)	14<24<31	Valeurs fortes observées dans les cas d'apport de matériaux argileux.

Les terrassements sont de l'ordre de 5 m³/ml.

Enrochements :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	3	masse mise en œuvre (t)	13<21<26	Le coût le plus faible est observé sur une opération pour laquelle seuls 20 % des enrochements sont importés.

Les quantités d'enrochements mobilisés sont de l'ordre de 10 à 20 t/ml.

8.2.3.2 Terrassement et enrochements – Travaux ponctuels

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Terrassement et enrochements – Travaux ponctuels	8	20<100<250 (hauteurs de 2 à 4 m)	Interventions d'urgence post-Xynthia. Pose d'un matelas de gabions sur l'opération la plus coûteuse. Réutilisation de matériaux sur place dans les opérations les moins coûteuses.

Le calcul des coûts linéaires sur les « travaux ponctuels » livre des valeurs nettement inférieures à celles observées sur les travaux menés en continu, du fait de la nécessité de considérer des longueurs d'ouvrages englobant l'ensemble des interventions.

En réalité, les coûts unitaires sur les terrassements et les enrochements sont assez proches de ceux calculés sur les opérations analysées précédemment.

Terrassement :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m³)	Observations
Terrassement	7	volume déplacé (m³)	12<30<46	Faibles volumes de terrassement pour les coûts unitaires les plus élevés.

Les terrassements sont inférieurs et souvent très inférieurs à 4 m³/ml.

Enrochements :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	8	masse mise en œuvre (t)	14<19<24	Abaissement du coût du fait de la réutilisation d'une partie des matériaux existant sur place.

Les quantités d'enrochements mobilisés sont inférieures et souvent très inférieures à 10 t/ml.

8.2.3.3 Reprise de maçonnerie

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Reprise de maçonnerie	1	1100 (hauteurs de 2 à 3 m)	Restauration de la digue de Brénéguy (56)

L'illustration 60 présente une vue globale de l'ouvrage. Les dépenses se répartissent à parts égales entre le rejointoiement et les autres interventions de reprise des parements et des vannes.

Maçonnerie :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût surfacique (€/m²)	Observations
Maçonnerie	1	Surface maçonnée (m²)	170	



Illustration 60 : digue de Brénéguy – vue globale
(source : locmariaquer.info)

8.2.3.4 Pose de gabions

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Pose de gabions	2	100<120<140 (hauteurs de 0,70 à 1 m)	Opérations de réfection en urgence post-Xynthia.

Sur les deux cas observés, le coût global est proportionnel à la hauteur de l'ouvrage (hauteur qui varie peu). Comme présenté ci-après le coût surfacique est presque constant.

Gabions :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût surfacique (€/m²)	Observations
Gabions	2	surface de parement en gabions (m²)	140<150<160	

8.2.3.5 Béton sur parement maçonné

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Béton sur parement maçonné	1	470 (hauteur de 2 m)	Opération de Vierville-sur-Mer (14)

Cette opération consiste en une réparation par la reconstitution en béton d'un parement maçonné sur une surface de 40 m². L'illustration 61 représente la mise en œuvre de cette technique sur la digue de la Loge du Guet sur l'île de Ré.



Illustration 61 : Réparation de la digue de la Loge-du-Guet – vue globale et vue détaillée
(source : www.notre-ile-de-re.com)

Comme il apparaît dans les tableaux ci-après, l'opération ne présente pas de difficulté particulière et le coût volumique du béton mis en œuvre correspond à un prix classiquement observé. L'épaisseur de béton étant faible, le coût surfacique reste modéré.

Béton :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m ³)	Observations
Béton	1	volume de béton (m ³)	310	Volume de béton : 14 m ³

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m ³)	Observations
Béton sur maçonnerie	1	Surface bétonnée (m ²)	110	Surface : 40 m ²

8.2.3.6 Béton sur enrochements (colmatage de brèches)

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Béton sur enrochements (colmatage de brèches)	1	620 (hauteur de 5 m)	Opération de Saint-Clément-des-Baleines (17). Linéaire de 1000 m. Coût hors apport d'enrochements en première urgence.

L'opération recensée est une réfection d'urgence post-Xynthia. Elle consiste en un calage par béton des enrochements déposés pour colmater des brèches sur des digues maçonnées (sur une longueur de 490 m), en un épaulement arrière des parapets (sur une longueur de 200 m), ainsi qu'en un rejointoiement et des reprises ponctuelles de maçonnerie. L'illustration 62 présente une coupe-type des travaux réalisés.

Le bétonnage des enrochements pour assurer leur liaisonnement correspond à des conditions plus difficiles que celles rencontrées sur un parement maçonné. Cela se traduit par un coût volumique du béton supérieur et surtout par une quantité de béton nécessaire pour combler les vides très importante (donc par un coût surfacique très élevé).

Béton :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m³)	Observations
Béton	1	volume de béton (m³)	450	Volume de béton : 897 m³.

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût surfacique (€/m²)	Observations
Béton sur enrochements	1	Surface bétonnée (m²)	740	Surface : 840 m².

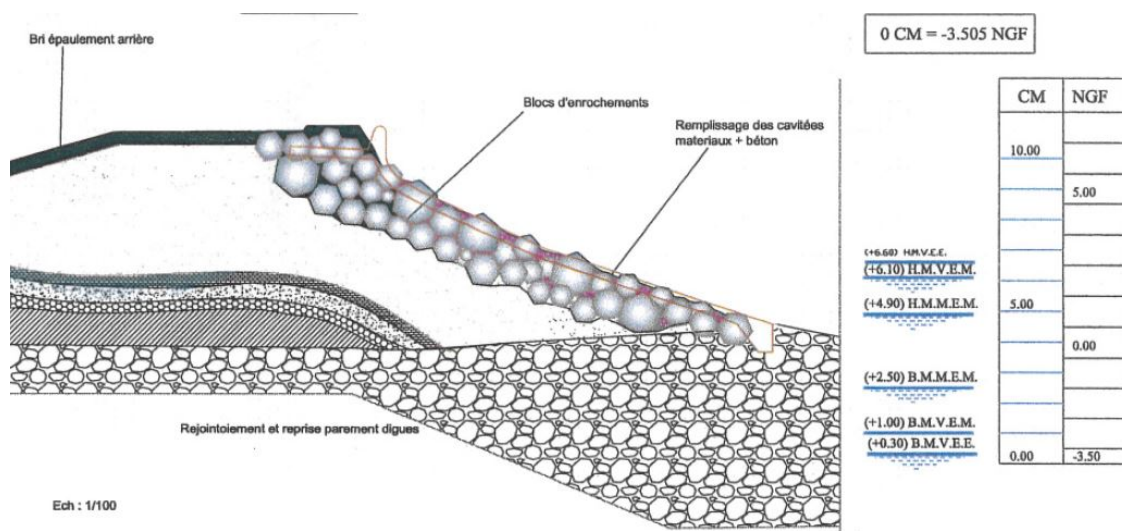


Illustration 62 : digue de Saint-Clément-des-Baleines – Coupe-type (échelle non respectée)
(source : CD17)

8.3 COÛTS OBSERVÉS SUR LES DIGUES SANS PAREMENT

Les coûts observés sur les digues sans parement sont présentés suivant les mêmes principes que ceux exposés en introduction de la section 8.2 consacrée aux digues avec parement. Ces digues ne disposant pas de parement, les seules techniques utilisées sont les terrassements. Lorsqu'un rapprochement est possible, les valeurs obtenues par l'application de notre méthodologie sont comparées à celles figurant dans le rapport du programme d'étude [Barcasub, juillet 2013] consacré à la submersion marine et à ses impacts sociaux et environnementaux dans le bassin d'Arcachon.

8.3.1 Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection

Les opérations recensées portent sur les digues de l'étier du Pouliguen (44) et les digues de retrait du marais d'Yves (17). Il s'agit donc d'ouvrages à l'abri des vagues. Les linéaires concernés sont compris entre 1 et 4 km. Les coûts observés dépendent étroitement de la hauteur des ouvrages, comme le précise le tableau suivant.

Digues sans parement – Travaux de construction, reconstruction, réfection					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Terrassement	1	420 (hauteur de 1,3 m y compris fondation)	NA	NA	NA
	3	900<1000<1200 (hauteurs de 2,0 à 3,0 m y compris fondation)			

Dans le cas de la digue de plus faible hauteur (digue en bordure de l'étier du Pouliguen (44)), l'environnement est partiellement urbanisé. Le coût global de 420 €/ml intègre des dépenses de voiries et réseaux divers, de génie civil et des mesures compensatoires. Les terrassements ne représentent finalement qu'environ 30 % du montant des travaux.

Dans le cas de la digue en retrait du marais d'Yves (longueur 4 000 m, hauteur de 2,0 à 2,5 m, coût linéaire : 930 €/ml), l'import d'argile représente 1 M€ sur un montant de travaux de 3,72 M€. Si l'on additionne à ce montant de travaux, les études, les mesures d'accompagnement et de suivi ainsi que les acquisitions foncières, le montant de l'investissement s'élève à 6,5 M€.

Dans le cadre du programme [Barcasub, juillet 2013], la construction de digues de hauteurs comprises entre 3 et 4 m, sur des polders (donc dans un environnement relativement peu contraint) et en utilisant la terre des polders, est estimée par le Conseil départemental de Gironde entre 570 et 660 €/ml. Pour une digue de 4,7 m, les estimations portent ce coût à 1 000 €/ml. Ces coûts sont proches de ceux observés sur les opérations étudiées, opérations qui portent sur des ouvrages de taille inférieure mais réalisées dans des conditions plus contraignantes.

8.3.2 Coûts observés sur les opérations de confortement

Les opérations recensées dans cette rubrique visent principalement la rehausse des digues ou la suppression des points bas. On peut ainsi distinguer :

- les travaux menés quasiment en continu sur les ouvrages ;
- les travaux menés ponctuellement.

Digues sans parement – Travaux de confortement					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Terrassement – Travaux « en continu »	2	250<260<300 (hauteurs de 2 à 3 m)	NA	NA	NA
	2	500<550<600 (hauteurs de 3 à 4 m)			
Terrassement – Travaux ponctuels	3	100<140<200 (hauteurs de 2,0 m environ)	NA	23<25<28 (terrassement)	NA

8.3.2.1 Confortement et rehaussement « en continu »

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Terrassement	2	250<260<300 (hauteurs de 2 à 3 m)	Opérations de Grues (85) et Loix (17). Rehaussements de 1,0 m et 1,5 m.
	2	500<550<600 (hauteurs de 3 à 4 m)	Réhabilitation de digues en baie de Bourgneuf

Les coûts de ces opérations varient principalement en fonction de la hauteur des ouvrages. Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux rapportés en Gironde dans le programme [Barcasub, juillet 2013] : à Certes et Graveyron, le renforcement des digues en terre, de hauteurs comprises entre 3,0 m et 3,50 m, est évalué à 200 à 300 €/ml « avec terre prise à proximité (par exemple dans les polders) ».

L'illustration 63 présente une digue de second rang située à Loix (17) sur l'île de Ré (son tracé est interrompu par un batardeau). Elle constitue depuis la tempête Xynthia une protection de proximité du quartier Lavaud.



Illustration 63 : digue du Fossé Martineau à Loix
(auteur : Marc Igigabel)

8.3.2.2 Confortement et rehaussement ponctuels

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Terrassement	3	100<140<200 (hauteurs de 2,0 m environ)	Digues situées au Grau-du-Roi (30), à la Couarde-sur-Mer (17) et à Séné (56). Opérations de rehaussement de 1,0 m environ.

Malgré l'implantation géographique très dispersée de ces opérations, les coûts linéaires restent compris dans des valeurs entre 100 et 200 €/ml.

Comme indiqué ci-après, les coûts volumiques des terrassements présentent des valeurs proches, ce qui contribue à resserrer les écarts sur le coût global.

Terrassement :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m³)	Observations
Terrassement	2	volume déplacé (m³)	23<25<28	Digues situées au Grau-du-Roi (30), à la Couarde-sur-Mer (17)

8.3.3 Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation

Digues sans parement – Travaux d'entretien ou réparation					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Terrassement	2	30<60<90 (hauteurs de 2,0 m environ)	NA	NA	NA

Seules deux opérations particulières de réparation (reprise ponctuelle de sections dégradées et comblement de brèches) ont été recensées sur des ouvrages de petite taille. Il s'agit d'opérations de montants inférieurs à 10 000 € ayant fait l'objet de passations de marchés de travaux par le Conservatoire du littoral de Bretagne. Les prestations ont été rémunérées à l'heure d'utilisation du matériel.

8.4 PARTS DES PRESTATIONS INTELLECTUELLES ET DES ACQUISITIONS FONCIÈRES DANS LE COÛT D'INVESTISSEMENT

En considérant des opérations portant principalement sur la reconstruction, le renforcement ou le confortement de digues, une décomposition du coût d'investissement a été effectuée dans le but de préciser la part que représentent les dépenses d'étude et d'acquisition foncière par rapport aux dépenses associées aux travaux (ces résultats sont utiles dans le cadre du calcul du coût global actualisé présenté en partie 1). Pour obtenir ces estimations, une enquête a été menée sur cinq **opérations concernant des ouvrages existants** implantés en front de mer ou en bordure d'estuaire ou sur des marais :

- reconstruction de la digue du Boutillon sur l'île de Ré ;
- reconstruction de la digue de Saint-Clément-des-Baleines sur l'île de Ré ;
- renforcement des digues d'Aytré et Angoulins (mise en sécurité de l'anse de Godechaud et du marais du Chay) ;
- confortement de la digue du Grenouillet à Grues (Estuaire du Lay en Vendée) ;
- réhabilitation des digues du secteur est de Loix (île de Ré).

Les résultats de l'enquête sont les suivants :

	Type d'intervention (création, confortement de l'ouvrage sur toute sa section, confortement d'un parement)	Études préparatoires et en phase travaux (AMO, évaluation environnementale, concertation, MOE, topographie, SPS) - Dépense HT	Acquisitions foncières et SAFER - Dépense HT	Travaux sur le système d'endiguement (digues et ouvrages intégrés) - Dépense HT	Total des dépenses HT	Contrainte particulière sur le plan environnemental
Boutillon (2012-2016)	Reconstruction	170 000 €	0 €	10 276 350 €	10 446 350 €	Activité ostréicole et touristique. Site classé.
		1,63%	0,00%	98,37%	100,00%	
Saint-Clément-des-Baleines (2010-2017)	Reconstruction	420 000 €	5 000 €	8 900 000 €	9 325 000 €	Site classé – aménagements paysagers (terrassements et plantations pour bois et dunes fixes et mobiles) : 542000€HT
		4,50%	0,05%	95,44%	100,00%	
Aytré-Angoulins (2012-2017)	Renforcement	315 000 €	5 000 €	3 800 000 €	4 120 000 €	RAS
		7,65%	0,12%	92,23%	100,00%	
Grues-Grenouillet sur le Lay (2013-2015)	Confortement de l'ouvrage sur toute sa section	69 156 €	1 039 €	518 983 €	589 179 €	Diagnostic initial. Etude d'incidence faune/flore + Etat des lieux avant travaux réalisé par un huissier. Une partie en zone Natura 2000.
		11,74%	0,18%	88,09%	100,00%	
Digues du secteur est de Loix (2013-2016)	Réhabilitation des digues de premier et second rangs	450 000 €	25 000 €	4 600 000 €	5 075 000 €	Traitement paysager de l'ensemble.
		8,87%	0,49%	90,64%	100,00%	

Sur les opérations étudiées, les travaux représentent entre 88 et 98 % des dépenses.

Il apparaît par ailleurs que les opérations de reconstruction, de renforcement ou de confortement n'impliquent que très peu de dépenses d'acquisitions foncières (entre 0,00 % et 0,50 % dans les opérations étudiées).

Les études représentent le poste de dépenses qui connaît le plus de variations. La position en site classé impose des contraintes sur le plan architectural, qui pèsent sur les choix techniques et entraînent une augmentation du montant des travaux. Par contre, elles n'engendrent pas d'augmentation du coût des études en proportion du coût des travaux. Ceci explique de faibles pourcentages consacrés aux études (4,5 %), voire extrêmement faibles (1,63 % sur le Boutillon

pour une digue de construction homogène sur un long linéaire). Les pourcentages observés sur Aytré-Angoulins ou les digues du secteur est de Loix sont des pourcentages classiques pour des travaux publics (prestations intellectuelles de l'ordre de 8 ou 9 % du montant des travaux). Dans le cas du confortement de la digue du Grenouillet à Grues, les forts enjeux de préservation de l'environnement sont sans doute à l'origine d'un pourcentage supérieur sans toutefois être excessif, de l'ordre de 12 %.

Il est à noter que les opérations étudiées concernent des ouvrages existants. Ces conclusions ne valent pas pour des opérations de constructions nouvelles qui impliqueraient l'achat de terrains. L'exemple de la digue en retrait du marais d'Yves (17) présenté en section 8.3.1 montre que les acquisitions foncières, les études et les mesures d'accompagnement et de suivi peuvent accroître très sensiblement le montant de l'investissement (dans le cas cité, les travaux seuls coûtent 3,7 M€ mais l'investissement global s'élève à 6,5 M€).

En complément de cette approche « statistique », la présentation de l'opération de reconstruction de la digue de Sangatte illustre plus concrètement ce que recouvrent les postes de dépenses, ainsi que les aléas auxquels une opération peut être soumise.

Cas de la reconstruction de la digue de Sangatte

Le cas de la reconstruction de la digue de Sangatte, déjà évoqué dans nos analyses en section 8.2.1.2, permet d'illustrer le détail des dépenses qui accompagnent une opération de travaux. Cette opération consiste principalement à reconstruire sur 2 400 m un ensemble continu de digues construites originellement sur trois périodes (cf. Illustration 64). L'option retenue pour les travaux est celle d'une protection en enrochements de l'ensemble. Par ailleurs, il est également prévu le remplacement du dispositif de maintien du sable, dispositif constitué d'alignements de pieux en bois.



Illustration 64 : localisation des ouvrages à reconstruire
(source : DDTM62)

Cas de la reconstruction de la digue de Sangatte

Le montage financier détaillé donne un bon aperçu des prestations intellectuelles qui peuvent accompagner une opération de ce type :

Objet des prestations	Coût HT (€)	Pourcentage
Marché maîtrise d'œuvre	216 265,89 €	1,30%
Levés topographiques	1 866,22 €	0,01%
Marché mission géotechnique G1	65 392,98 €	0,39%
Marché mission géotechnique G2	41 146,15 €	0,25%
Participation des archéologues	8 578,60 €	0,05%
Marché sécurité protection de la santé (SPS)	3 852,84 €	0,02%
Marché ingénieur écologue (suivi des travaux de reconstruction et des travaux de compensation, établissement d'un plan de gestion ...)	36 822,74 €	0,22%
Marché de travaux de compensation environnementales (déplacement d'espèces protégées ...)	70 074,98 €	0,42%
Marché travaux	15 574 384,08 €	93,80%
Dépollution pyrotechnique	585 284,28 €	3,53%
Total	16 603 668,76 €	100,00%

Finalement ce tableau confirme qu'une solution technique homogène retenue sur un linéaire important permet de limiter la proportion des dépenses consacrées aux prestations intellectuelles à un pourcentage faible (2,25 %).

Par contre sur une telle opération, une sujétion technique qui s'impose sur tout le linéaire du projet, en l'occurrence la nécessité de procéder à une dépollution pyrotechnique, suffit à augmenter assez sensiblement son montant (ici un accroissement de 3,5 % des dépenses).

8.5 DÉPENSES LINÉAIRES ANNUELLES MOYENNES DE GESTION ET D'ENTRETIEN

En complément des sections précédentes, qui traitent du coût de la protection contre les submersions marines en considérant des opérations particulières de travaux sur des ouvrages ciblés, la présente section aborde ce même sujet, du point de vue des dépenses associées à des parcs d'ouvrages sur de longues périodes. L'objectif est d'établir des moyennes annuelles, en rapportant les dépenses au linéaire de digue et à la durée. Cependant, concernant les dépenses d'investissement, ni la période précédant Xynthia (marquée par un retard dans les investissements), ni la période suivant Xynthia (marquée par des investissements à un rythme très soutenu) ne permettent d'évaluer les sommes qu'il faudrait consacrer en moyenne annuellement pour l'adaptation et la modernisation des parcs. Nous limiterons donc notre étude aux dépenses consacrées à la gestion et à l'entretien, dépenses destinées à pérenniser un niveau de protection considéré comme satisfaisant. Dans notre analyse, nous mettrons davantage l'accent sur les dépenses d'entretien (maintenance et réparation) faisant l'objet de marchés dédiés, que sur les dépenses de gestion (frais généraux et de fonctionnement des services gestionnaires) qui ne peuvent être appréhendées que plus globalement.

Deux modes d'évaluation peuvent être envisagés pour calculer les dépenses annuelles linéaires d'entretien :

- calcul sur la base des budgets d'entretien des parcs ;
- calcul d'un pourcentage du coût d'investissement.

Pour chacun de ces deux modes d'évaluation, nous traiterons distinctement du cas des digues avec parement et de celui des digues sans parement.

Rappelons que les « dépenses linéaires annuelles » sont des moyennes rentrant en ligne de compte dans le calcul du coût global actualisé d'un projet (cf. section 1). Elles donnent aussi une indication du niveau de dépenses à prévoir pour les budgets d'entretien. Néanmoins, pour une année donnée, la somme réellement dépensée dépendra naturellement des événements météo-marins qui se produiront au cours de la période. Sur une année calme, et si l'état des ouvrages est bon ou que d'autres circonstances favorables existent (par exemple des ouvrages facilement réparables), les dépenses pourront être très inférieures à cette moyenne. À l'inverse, si une tempête exceptionnelle survient (ou qu'une série de tempêtes rapprochées frappent le littoral comme ce fut le cas au cours de l'hiver 2013/2014 sur la façade atlantique), les dépenses nécessaires pourront être très supérieures.

8.5.1 Exploitation des budgets d'entretien et de gestion

Pour les digues disposant d'un parement, nous mènerons une étude particulière sur deux parcs d'ouvrages situés sur le littoral français et plus précisément sur le littoral vendéen : l'île de Noirmoutier et la baie de Bourgneuf.

Pour les digues ne disposant pas de parement, le domaine littoral se prête fort mal à la réalisation d'une telle étude, car dans les systèmes d'endiguement côtiers, une grande partie des dépenses est orientée vers des ouvrages pourvus de parements. Il devient dès lors difficile de distinguer les dépenses qui relèvent des ouvrages sans parement. Par ailleurs, la taille des parcs d'ouvrages sur le littoral est largement inférieure à celles des parcs qui bordent les grands fleuves français. Il est donc préférable pour établir des moyennes de s'appuyer sur les conclusions du volet fluvial de notre étude [Cerema, 2014]

8.5.1.1 Cas des digues avec parement

L'île de Noirmoutier et la baie de Bourgneuf présentent des systèmes d'endiguement sur lesquels la plupart des dépenses d'entretien sont consacrées à des ouvrages de protection pourvus d'un parement. Nous analyserons tout d'abord les dépenses associées à chacun de ces deux parcs puis nous apprécierons la possibilité de généraliser les valeurs obtenues.

Les dépenses d'entretien de l'île de Noirmoutier

La communauté de Communes de l'île de Noirmoutier gère les réparations sur les ouvrages au travers de deux marchés à bons de commandes respectivement consacrés aux prestations intellectuelles et aux travaux. Ces marchés portent à la fois sur les 32 km de digues (24 km d'ouvrages en front de mer et 8 km d'ouvrages bordant les étiers) et sur les 23 km d'ouvrages de gestion du trait de côte (5 km d'épis et 18 km d'ouvrages longitudinaux (perrés, murs, pieux)).

Les valeurs maximales et minimales de dépenses sont établies comme suit :

- maîtrise d'œuvre et suivi travaux : 10 000 € à 50 000 € HT ;
- travaux : 100 000 € à 500 000 € HT.

Suivant les années, les dépenses d'entretien sont donc comprises entre 110 000 et 550 000 €. En moyenne, les dépenses avoisinent 220 000 € HT (200 000 € HT de travaux et 20 000 € HT de prestations intellectuelles).

La clef de répartition des dépenses entre digues et ouvrages de protection des dunes est la suivante :

- pour les 32 km de digues : entre 40 000 € HT/an et 150 000 € HT/an ;
- pour les 23 km d'ouvrages de gestion du trait de côte : entre 70 000 € HT/an et 400 000 € HT/an.

Les dépenses linéaires annuelles d'entretien sont donc comprises :

- pour les digues : entre 1 250 et 4 700 €/km/an avec une moyenne de l'ordre de 2 500 €/km/an ;
- pour les ouvrages de gestion du trait de côte : entre 2 200 et 12 500 €/km/an avec une moyenne de l'ordre de 4 400 €/km/an.

Les dépenses d'entretien de la baie de Bourgneuf

En baie de Bourgneuf, Challans Gois Communauté dispose d'un marché à bons de commandes pour les travaux d'entretien (réparations / végétation) avec un maximum de dépenses fixé à 50 000 € TTC/an. Ce marché concerne des interventions potentielles sur un linéaire de 20 km de digues littorales. À noter que ce marché apparaît aujourd'hui limité. Il sera relancé en augmentant le plafond annuel à 70 000 voire 100 000 € TTC/an.

En retenant la valeur haute de 100 000 € TTC/an soit environ 84 000 € HT/an et une valeur minimale cinq fois inférieure (comme pour l'exemple de Noirmoutier), les dépenses linéaires annuelles d'entretien ressortent entre 850 et 4 200 € HT/km/an avec une moyenne de l'ordre de 1 700 €/km/an.

Conclusion

En considérant les deux cas étudiés, les dépenses annuelles linéaires d'entretien pour les digues avec parement varient dans les limites et avec les moyennes suivantes :

	Dépenses linéaires annuelles observées (€/km/an HT)
Île de Noirmoutier	1250<2500<4700
Baie de Bourgneuf	850<1700<4200

Les dépenses observées sur les deux sites sont relativement proches. Les différences entre les valeurs peuvent s'expliquer à la fois par des facteurs physiques (niveau d'exposition aux conditions hydrodynamiques, composition et accessibilité des ouvrages) et par des politiques plus ou moins volontaristes dépendant des enjeux à protéger.

Aux dépenses d'entretien s'ajoutent les frais de gestion. Étant donné qu'il n'est pas possible de distinguer formellement dans les budgets de fonctionnement les dépenses associées aux digues et celles associées aux autres ouvrages, nous adoptons pour la gestion les valeurs

observées sur le domaine fluvial. **En synthèse, les valeurs suivantes peuvent donc être retenues pour les digues avec parement :**

	Dépenses linéaires annuelles observées (€/km/an HT)
Entretien	1000<2000<5000
Gestion	2000<2300<3800
Total	3000<4300<8800

A titre de comparaison, sur la base du cas de l'île de Noirmoutier, un calcul équivalent donne les dépenses suivantes **pour les ouvrages de gestion du trait de côte :**

	Dépenses linéaires annuelles observées (€/km/an HT)
Entretien	2200<4400<12500
Gestion	2000<2300<3800
Total	4200<6700<16300

8.5.1.2 Cas des digues sans parement

Le cas des digues en terre a été étudié de façon approfondie dans le volet fluvial de cette étude [Cerema, 2014] sur la base de l'analyse des budgets des trois plus grands parcs d'ouvrages en France (Loire, Rhône et Isère-Drac-Romanche). Les conclusions tirées au niveau du volet fluvial sont applicables au domaine côtier dans la mesure où les digues en terre non pourvues d'enrochements ne sont généralement pas exposées directement à l'action des vagues et ne se différencient guère des digues fluviales au niveau de leur constitution.

Le tableau de synthèse suivant donne les ordres de grandeur qui peuvent être retenus pour les **dépenses annuelles d'entretien et de gestion rapportées au kilomètre de digue.**

	Dépenses linéaires annuelles observées (€/km/an HT)
Entretien	4400<6300<8500
Gestion	2000<2300<3800
Total	6400<8600<12300

8.5.2 Évaluation des dépenses d'entretien en pourcentages du coût d'investissement

Le calcul consiste à exprimer les dépenses d'entretien comme un pourcentage de l'investissement initial (construction, reconstruction, voire confortement).

Ce mode d'évaluation est rencontré classiquement dans la bibliographie et couramment utilisé dans les programmes d'investissement. À noter que par ce mode d'évaluation, seules sont considérées les dépenses d'entretien, les dépenses de gestion étant vues comme des dépenses générales de fonctionnement du service, dépenses qui ne sont guère influencées par une opération d'investissement classique (cette hypothèse est a priori conservatrice pour une opération d'investissement sur un ouvrage existant – cas le plus fréquent – puisque cette opération d'investissement doit a priori permettre de réduire les coûts de gestion. Il peut

néanmoins être pertinent d'envisager une évaluation de l'impact d'une opération sur les coûts de gestion dans certains cas : révision complète d'un parc d'ouvrages, extension du parc par la construction d'ouvrages nouveaux...).

Le calcul du coût global actualisé considère souvent une fraction fixe de l'investissement initial. Le changement climatique et la surélévation du niveau de la mer peuvent néanmoins avoir une forte influence et induire une variation des dépenses sur le long terme. Dans tous les cas, il est fortement conseillé de réaliser une analyse de sensibilité sur ce pourcentage (par ailleurs, le taux d'actualisation devrait également faire l'objet d'une analyse de sensibilité).

Pour l'expression des dépenses d'entretien comme pourcentage de l'investissement initial, nous considérons deux situations :

- le cas d'un ouvrage particulier, construit, reconstruit ou réhabilité et qui, sur sa durée de service, connaît des opérations d'entretien, jusqu'à ce qu'une nouvelle opération de réhabilitation doive être menée ;
- le cas d'un parc d'ouvrages dont le périmètre ne varie pas substantiellement (peu ou pas de constructions d'ouvrages nouveaux) et dont les différentes structures ont des dates de construction, reconstruction ou réhabilitation échelonnées dans le temps. Sur un tel parc :
 - à la condition qu'une politique d'investissement soit menée pour maintenir, par des travaux lourds, sur l'ensemble des ouvrages, un état satisfaisant (ce qui ne peut en général pas être assuré par les seules opérations d'entretien), le rapport des dépenses d'entretien sur les dépenses d'investissement permet d'apprécier pour des projets particuliers les dépenses moyennes annuelles nécessaires en entretien ;
 - si la condition précédente n'est pas respectée (cas d'un parc dont les dépenses d'investissement ne permettent pas le maintien des ouvrages dans un état jugé suffisant), ce calcul à l'échelle d'un parc d'ouvrages ne peut fournir une estimation des dépenses moyennes annuelles nécessaires en entretien.

Dans cette section, nous traiterons distinctement des digues avec et sans parement.

8.5.2.1 *Cas des digues avec parement*

Pour étudier le cas des digues avec parement, nous nous appuyerons uniquement sur la bibliographie. Bien que nous disposions d'éléments chiffrés pour effectuer les calculs sur l'île de Noirmoutier, le fait que le système soit en cours de révision ne permet pas, comme annoncé en introduction, de tirer des conclusions générales. Nous étudierons néanmoins ce cas séparément pour mieux comprendre les liens qui existent entre les dépenses d'investissement et celles d'entretien.

Il ressort des références bibliographiques en général et de [Heberger et al., mai 2009] en particulier que les dépenses moyennes annuelles consacrées aux travaux d'entretien sur les ouvrages de génie civil représentent de l'ordre de 1 à 5 % des investissements initiaux.

En tenant compte de l'état et de l'exposition des ouvrages, ces chiffres nous paraissent pouvoir **être précisés. Ainsi, nous proposons de retenir les dépenses annuelles moyennes d'entretien suivantes, exprimées comme pourcentages de l'investissement initial :**

- **pour des ouvrages en bon état, entre 2 et 3 % (une valeur de 1 % correspond à des conditions particulièrement favorables : ouvrages très peu exposés ou surdimensionnés...) ;**
- **pour des ouvrages dont l'état est médiocre ou dégradé, entre 3 et 5 %, en considérant que des ouvrages dégradés imposent des dépenses supérieures.**

Étude du cas de l'île de Noirmoutier

L'exemple de l'île de Noirmoutier peut être étudié pour apprécier comment, sur un vaste parc d'ouvrages côtiers en cours de révision, le niveau des dépenses d'entretien se positionne par rapport aux dépenses d'investissement. La Communauté de communes de l'île de Noirmoutier (CCIN) met en œuvre sur la période 2013-2018 un programme d'investissement de 14,8 M€ HT dont 3,3 M€ HT sur les digues (tel que présenté en section 5.3.1), soit 550 000 €/an, ce qui rapporté aux 32 km de digues donne une dépense linéaire annuelle d'investissement de 17 200 €/km/an.

Si l'on compare cette valeur aux dépenses linéaires annuelles d'entretien (telles que présentées en section 8.5.1.1), le tableau suivant peut être dressé :

	Minimum (€HT/km/an)	Moyenne (€HT/km/an)	Maximum (€HT/km/an)
Dépense linéaire annuelle d'entretien	1250	2500	4700
Pourcentage entretien/investissement	7%	15%	27%

Ces résultats montrent qu'en considérant les seules dépenses d'entretien, le coût annuel atteint au minimum 7 % et en moyenne 15 % des dépenses d'investissement. En cas d'événement exceptionnel, il est même prévu que les réparations d'urgence fassent culminer ce pourcentage à 27 % des dépenses d'investissement.

Interprétation de ces résultats : sur la période considérée, les dépenses en entretien sont élevées pour répondre au fait que les ouvrages n'ont pas encore tous bénéficié d'un confortement et présentent donc encore une certaine fragilité (ce qui justifie par ailleurs que le rythme des dépenses d'investissement sur cette même période est soutenu). À la fin du programme de renforcement des ouvrages, on peut considérer que les dépenses d'entretien pourront être réduites et qu'en considérant une longue période (de l'ordre de 30 ans) à la suite de cette « remise à niveau », les dépenses annuelles d'entretien représenteront par rapport aux dépenses d'investissement un pourcentage plus faible. Des échanges avec la CCIN, il ressort que le maître d'ouvrage envisage effectivement une réduction de ces dépenses, sans être en mesure néanmoins de la quantifier précisément. À titre indicatif, pour que les valeurs minimum et moyenne des dépenses d'entretien atteignent un pourcentage de 1 à 3 %, une réduction de 80 % de leur montant devrait être opérée par rapport à la période étudiée. (Il faut pour cela supposer au préalable que les investissements se poursuivent sur un rythme suffisant et que les réparations lourdes liées à des événements exceptionnels soient prises en charge dans ce cadre, ce qui revient à ne pas prendre en considération la valeur maximum figurant dans le tableau ci-dessus comme représentative des dépenses « d'entretien ».)

8.5.2.2 Cas des digues sans parement

Pour traiter le cas des digues sans parement, nous nous appuyerons d'une part sur la bibliographie et d'autre part sur le volet fluvial de cette étude [Cerema, 2014].

Apport de la bibliographie

Nous disposons principalement de l'étude [Heberger et al., mai 2009] sur les digues sans parement de Californie, qui précise que :

« les dépenses d'entretien pour des digues ne disposant pas de protection par des parements de génie civil sont comprises entre 5 et 15 % des dépenses d'investissement. »

Exploitation du volet fluvial de l'étude [Cerema, 2014]

Pour les mêmes raisons que celles évoquées en section 8.5.1, nous nous baserons pour cette évaluation sur les budgets d'investissement et les budgets de gestion et d'entretien des grands parcs d'ouvrages fluviaux abordés dans [Cerema, 2014].

En ne considérant que les dépenses d'entretien, les résultats sont les suivants :

Dépenses linéaires annuelles observées (€/km/an HT)	Loire	Isère, Drac, Romanche	Rhône
Investissement	7500	33800	104000
Entretien	8500	4400	6300
Dépenses d'entretien exprimées en pourcentage des dépenses d'investissement	113%	13%	6%

Les investissements sur la Loire étant très faibles, les dépenses annualisées sont supérieures en entretien. Cette situation peut également apparaître sur un parc d'ouvrages côtiers dont la politique consisterait à axer l'essentiel des actions sur l'entretien, sans programme soutenu de confortement ou de réfection des ouvrages.

Sur l'Isère, le Drac et la Romanche, un programme d'investissement important est mené et l'on observe que le montant annuel des dépenses d'entretien s'élève tout de même à 13 % du montant annualisé des investissements. Cette situation s'explique par le fait que ces évaluations ont été menées alors que le programme d'investissement ne produisait pas encore ses premiers effets (début des opérations de travaux). Les dépenses d'entretien et de gestion devraient donc rester élevées. Cette situation est tout à fait comparable à celle de l'île de Noirmoutier sur la période 2013-2018, telle qu'étudiée précédemment.

Sur le Rhône, le programme d'investissement a été lancé plus tôt (travaux largement engagés au moment de l'étude). Le montant des dépenses annualisées d'entretien représente 6 % des dépenses annualisées d'investissement. Logiquement, à la fin du programme de sécurisation des ouvrages de protection, ce pourcentage devrait encore avoir baissé.

D'une manière générale, en considérant des ouvrages qui, au terme d'un projet de construction, reconstruction ou réhabilitation sont en bon état, la fourchette donnée par [Heberger et al., mai 2009] de 5 à 15 % du coût d'investissement à consacrer annuellement à l'entretien paraît excessive. Pour mieux apprécier ce pourcentage, prenons l'exemple des digues sans parement de hauteur 2 à 3 m (cas le plus répandu). Le coût de construction, reconstruction ou confortement sur l'ensemble des opérations recensées a une valeur moyenne de 500 €/ml. La moyenne des coûts linéaires annuels établis sur le domaine fluvial est de 6,4 €/m/an, ce qui correspond à seulement 1,3 %. Ce chiffre est représentatif des dépenses moyennes annuelles consenties pour l'entretien des digues fluviales mais, dans de nombreux cas, les gestionnaires ont souligné que ces dépenses devraient idéalement être augmentées pour assurer un maintien suffisant des performances. Nous proposons donc de retenir la valeur de 2 % comme valeur basse pour des ouvrages en bon état.

Conclusion

Nos investigations confirment que les dépenses annuelles d'entretien ne peuvent pas être calculées sur une courte période comme pourcentage des dépenses annuelles d'investissement sur un parc dont l'état des ouvrages est dégradé (en l'absence de politique d'investissement soutenue, les dépenses annuelles moyennes en entretien peuvent devenir supérieures à celles consenties en investissement). Un calcul de ce type pourrait éventuellement être envisagé en considérant les dépenses sur une période beaucoup plus longue, qui intégrerait la construction ou la réfection des ouvrages. Toutefois, ce calcul ne peut être mené de façon précise, ne serait-ce qu'en raison de la difficulté pour se procurer les informations sur le coût

des opérations anciennes et réactualiser ces coûts sur de très longues périodes. L'évolution des techniques de construction au cours des dernières décennies réduit encore davantage l'intérêt de ce genre d'approche.

Par ailleurs, les chiffres proposés par [Heberger et al., mai 2009] conduisent, sur des ouvrages en bon état, à surestimer les dépenses d'entretien. Nous proposons donc de retenir la fourchette de 5 à 10 % pour des ouvrages dont l'état est médiocre et d'écarter les valeurs de 10 à 15 % qui correspondent à des ouvrages dont l'état n'est pas satisfaisant et pour lesquels une opération de réhabilitation ou de confortement devrait être menée en premier lieu. Ainsi, **nous proposons de retenir les dépenses annuelles moyennes d'entretien suivantes, exprimées comme pourcentages de l'investissement initial :**

- pour un ouvrage en bon état, un pourcentage de 2 à 5 % ;
- pour un ouvrage dont l'état est médiocre, un pourcentage de 5 à 10 %.

9. Coûts observés sur les ouvrages de génie civil (perrés, murs et ouvrages de soutènement, épis, brise-lames et butées)

Cette section apporte des éclairages sur le coût des ouvrages de génie civil : perrés, murs et ouvrages de soutènement, épis, brise-lames et butées de bas de plage ou de pied de dune.

Les sites d'implantation de ces ouvrages sont tout aussi bien ceux sur lesquels des stratégies d'aménagement globales ont été mises en œuvre (gestion du trait de côte et protection contre les submersions marines) que des sites sur lesquels des interventions plus ponctuelles (portant en général sur un seul ouvrage) ont été menées. Dans tous les cas, les ouvrages de génie civil s'étendent sur des linéaires limités et sont très hétérogènes dans leur conception et leurs dimensions.

De la même façon que pour les digues, nous nous intéresserons :

- aux coûts des opérations particulières d'investissement (construction reconstruction, réfection ou confortement) ou d'entretien (opérations régulières ou opérations de réparation suite à une tempête). Les valeurs recherchées sont le coût linéaire, éventuellement complété en fonction des techniques par des coûts volumiques, surfaciques ou massiques. Cette analyse sera basée sur l'exploitation des données issues des marchés de travaux et des tableaux de suivi financier des PAPI ;
- aux coûts moyens annuels qui ne peuvent être calculés sur la base de budgets de gestion et d'entretien qu'en considérant un ensemble d'ouvrages suffisamment homogène sur des durées suffisamment longues. Comme ces conditions ne sont pas réunies pour les ouvrages de génie civil étudiés dans la présente section, les recommandations pour le calcul des coûts moyens annuels seront exprimées sous forme de pourcentages des coûts d'investissement (et non sous forme de dépenses linéaires annuelles moyennes exprimées en euros).

Tous les coûts sont exprimés en euros et hors taxes. Le mois de référence est octobre 2014.

9.1 COÛTS OBSERVÉS SUR LES PERRÉS

Les opérations recensées sur les perrés font ressortir des modes d'intervention bien spécifiques :

- en construction, reconstruction ou réfection, les interventions sont dominées par la pose d'enrochements. Une seule opération utilisant le béton armé est recensée ;
- en confortement, les interventions sont réparties équitablement entre enrochements et béton armé et maçonnerie ;
- en entretien ou en réparation, seule une opération de réfection de joint est recensée sur un ouvrage en béton.

9.1.1 Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection

Perrés – Travaux de construction, reconstruction, réfection					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Enrochements	1	370 (hauteur 2m)	NA	NA	14<21<31 (enrochements)
	2	650<750<900 (hauteurs 3 à 4 m)	NA	NA	
	1	1000<1100<1200 (hauteurs 4 à 6 m)	NA	NA	
Béton	1	1600 (hauteur de 6 m)	NA	390 (béton armé)	NA

Pour une meilleure précision, les coûts observés sont présentés selon les hauteurs des ouvrages concernés. Sur les perrés en enrochements, les valeurs progressent logiquement en fonction de la hauteur. L'illustration 65 présente deux exemples de réalisation de perrés sur l'île de Noirmoutier : l'un de faible hauteur en construction à Barbâtre et l'autre de plus grande hauteur construit en urgence à l'Épine.

Le perré en béton, à hauteur équivalente, présente un coût assez sensiblement supérieur.

Les coûts massiques des enrochements et le coût volumique du béton n'appellent pas de commentaire particulier.



(1)



(2)

Illustration 65 : perré de la pointe de la Fosse à Barbâtre (1)
et perré des Eloux à L'Épine, construit en conditions d'urgence (2)
(source : CCIN)

9.1.2 Coûts observés sur les opérations de confortement

Perrés – Travaux de confortement					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Enrochements	3	800<2200<2900 (hauteurs de 3 à 6 m)	NA	NA	13<34<58 (enrochements)
Palplanches, béton et maçonnerie	3	1350<1600<1850 (hauteurs comprises entre 4 et 5 m)	NA	NA	NA

Le confortement des perrés par des enrochements présente sur les opérations recensées des coûts supérieurs à ceux observés en construction dans la rubrique précédente. S'agissant de rechargements massifs (entre 50 et 100 t d'enrochements par mètre linéaire), cette situation n'est pas anormale. La dispersion des coûts linéaires sur les opérations de confortement utilisant des enrochements s'explique en partie par le coût massique de ces matériaux : un très fort écart apparaît entre l'opération à 13 €/t de Treffiogat (29) et celle à 58 €/t de Valras (34).

Trois opérations plus complexes de confortement de perrés sont recensées sur l'île de Noirmoutier. Ces opérations comportent plusieurs ateliers :

- pose de palplanches et d'une longrine béton en pied ;
- rejointoiement de la maçonnerie ;
- remplacement du muret en tête.

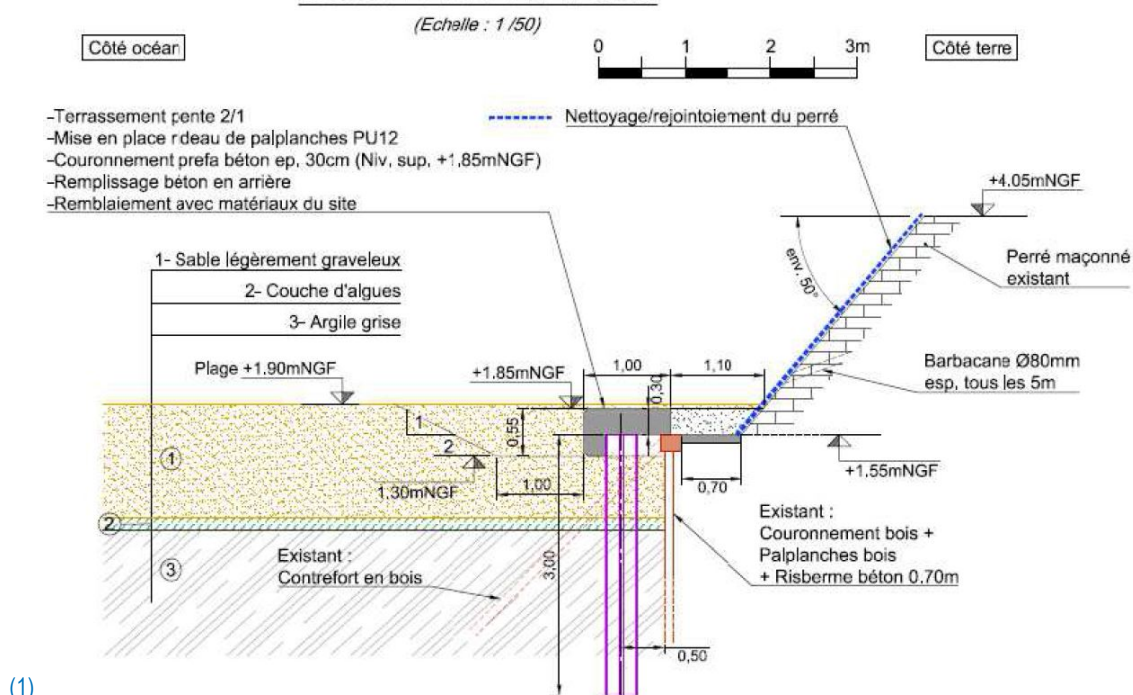
La coupe-type et une photographie de ces travaux sont représentées en Illustration 66. Ces opérations ont un coût linéaire moyen de 1 600 €/ml, abstraction faite d'une opération qui s'est effectuée dans des conditions géotechniques favorables (toit calcaire) et qui n'a pas nécessité de travaux lourds en pied (le coût linéaire de cette tranche de travaux est deux fois inférieur à celui des autres tranches : 750 €/ml).

9.1.3 Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation

Perrés – Travaux d'entretien ou réparation					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Réfection de joints de liaison et injection de fissures	1	54	NA	390 (béton injecté)	NA

Une seule opération de réparation a été recensée sur un perré en béton. Cette opération a été menée à Saint-Trojan-les-Bains (17) après la tempête Xynthia et a consisté en la réfection de 70 m de joint et en la pose d'une tôle de protection en acier inox.

COUPE TYPE RF8bis



(1)



(2)



(3)

Illustration 66 : coupe-type (1)
(auteur : Arcadis)
et photographies de l'intervention sur le perré de la Guérinière :
mise en œuvre des palplanches (2), réalisation de la longrine (3)
(auteur : Michel Pottier)

9.2 COÛTS OBSERVÉS SUR LES MURS ET OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT

La majorité des interventions recensées qui impliquent des murs et ouvrages de soutènement sont des opérations de construction visant à la création d'une protection contre les submersions. La partie visible de ces ouvrages est souvent de faible hauteur (de l'ordre d'un mètre), mais de grandes différences de conception existent sur les fondations ou sur les dispositions constructives destinées à améliorer l'insertion dans des sites souvent urbains. Ceci se traduit par des différences significatives dans les coûts de construction.

En complément, l'étude de quelques opérations de confortement et d'entretien ou de réparation apportera un éclairage sur les dépenses prévisibles sur la durée de vie de ce type d'ouvrage.

9.2.1 Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection

Murs et ouvrages de soutènement – Travaux de construction, reconstruction, réfection					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Muret en béton et barrières anti-submersion avec fondations de 1 m	5	1000<1300<2000 (hauteurs de 0,70 à 1,2 m hors fondations)	NA	NA	NA
Mur en béton avec fondations de profondeur 1 m	2	1600 (hauteurs de 2 à 3 m)	NA	320<340<360 (béton)	NA
Muret en béton avec fondations superficielles	3	100<165<210 (hauteurs de 0,50 à 0,7 m hors fondations)	160<210<270	NA	NA
Palplanches	1	1200 (hauteur de 1 m hors fondations)	NA	NA	NA

Une certaine diversité existe dans la conception de ces ouvrages. En première approche, l'élément le plus discriminant pour le coût (au-delà du type de matériau et de la hauteur de l'ouvrage) est l'existence ou l'absence d'une fondation sur une profondeur d'environ 1 m.

9.2.1.1 Muret en béton et barrières anti-submersion avec fondations de profondeur 1 m

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Muret en béton et barrières anti-submersion avec fondations de 1 m	5	1000<1300<2000 (hauteurs de 0,70 à 1,2 m hors fondations)	Coûts intégrant les travaux de VRD. Murets en bordure d'étier sur le Pouliguen (souvent forme de jardinières) ou sur les ports de l'île de Ré (béton armé habillé de pierres de taille). Murets interrompus par des batardeaux en aluminium.

Ce type d'ouvrage présente d'une part des dispositions spéciales pour limiter strictement les risques de défaillance (résistance à toutes formes d'érosion et d'instabilité). L'existence de fondations sur une hauteur équivalente à la hauteur hors sol de l'ouvrage est une disposition majeure destinée à garantir cette sûreté. D'autre part, ces ouvrages s'intègrent dans l'aménagement de sites fortement contraints (sites urbanisés, sites classés). Ces murets prennent donc la forme de jardinières ou présentent en parement, voire sur l'ensemble de leur structure, des matériaux nobles (pierres de taille). Leurs tracés sont interrompus par des batardeaux afin de permettre les déplacements en temps normal. Le coût de ces murets, en incluant le coût des barrières destinées à assurer la continuité du dispositif, dépasse 1 000 €/ml et atteint même à la Flotte (17), sur l'île de Ré, 2 000 €/ml.

En considérant uniquement le coût de la construction des ouvrages et en excluant les coûts des travaux de VRD, les valeurs suivantes sont obtenues sur les murets bordant l'étier du Pouliguen (44) :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût linéaire (€/m)	Observations
Muret en béton et barrières anti-submersion	3	linéaire de murets et de batardeaux (m)	600<700<800	Valeurs obtenues sur les murets de l'étier du Pouliguen.

Les coupes-types de ces ouvrages sont représentés en Illustration 67 (mur en T), en Illustration 68 (muret formant jardinière) et en Illustration 69 (batardeau).

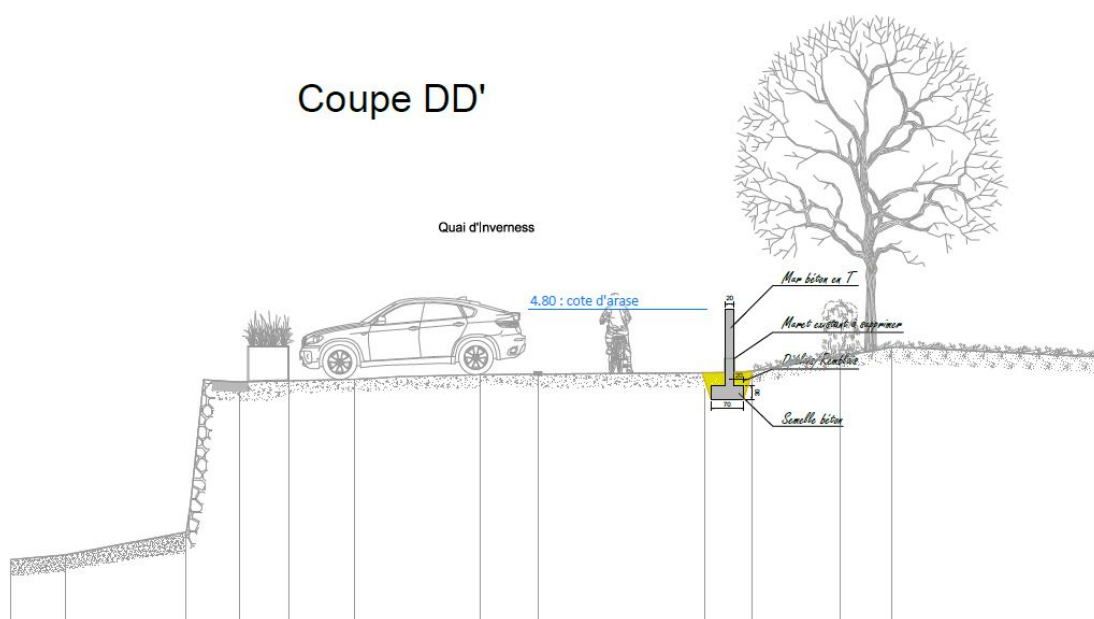


Illustration 67 : coupe-type d'un mur en T bordant l'étier du Pouliguen (44)
(auteur : Artelia)

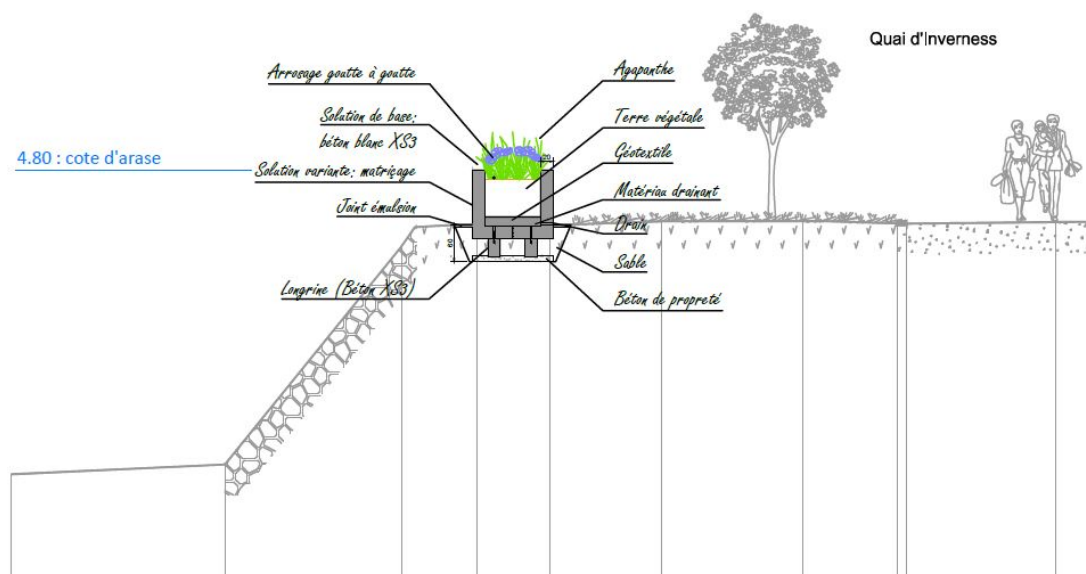


Illustration 68 : coupe-type d'un muret formant jardinière bordant l'étier du Pouliguen (44)
(auteur : Artelia)

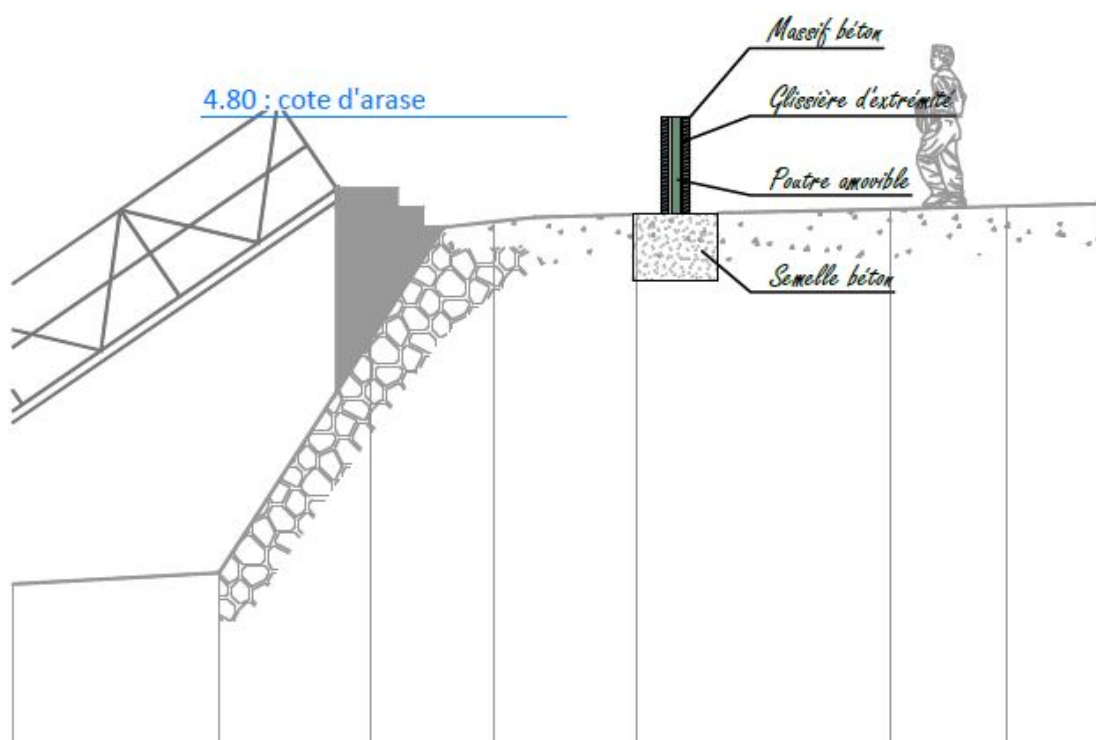


Illustration 69 : coupe-type d'un batardeau en bordure de l'étier du Pouliguen (44)
(auteur : Artelia)

9.2.1.2 Mur en béton avec fondations de profondeur 1 m

Dans cette rubrique ont été distinguées les opérations dont les ouvrages ont une hauteur supérieure à 1,5 m.

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Mur en béton avec fondations de profondeur 1 m	2	1600 (hauteurs de 2 à 3 m)	La valeur de 4000 €/ml est observée sur l'île de Sein. En corrigeant le coût d'installation de chantier (à 4 % au lieu des 64 % du marché), le coût linéaire est égal à celui de l'autre opération (1600 €/ml).

Sous réserve de corriger le coût de construction de l'ouvrage de l'île de Sein pour neutraliser les frais liés à la position insulaire, le coût linéaire des deux opérations est proche de 1 600 €/ml. L'écart entre les coûts volumiques du béton est également réduit comme le montre le tableau ci-après.

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m³)	Observations
Béton	2	volume de béton (m³)	320<340<360	Mur en T sur l'île de Ré (hauteur 2,0 m) et mur poids sur l'île de Sein (hauteur 2,6 m).

9.2.1.3 Muret en béton avec fondations superficielles

Des coûts nettement inférieurs apparaissent sur des ouvrages isolés ou des parapets. Ces structures en béton ou en maçonnerie sont fondées superficiellement et n'ont qu'une très faible hauteur (de 0,5 à 0,7 m).

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Muret en béton avec fondations superficielles	3	100<165<210 (hauteurs de 0,50 à 0,7 m hors fondations)	Ces structures de faibles hauteurs sont assez rudimentaires.

Les coûts surfaciques du parement de ces ouvrages dépendent des matériaux utilisés :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût surfacique (€/m²)	Observations
Parpaings enduits, maçonnerie, béton armé	3	Surface maçonnée (m²)	160<210<270	Les coûts correspondent par valeurs croissantes aux parpaings, à la maçonnerie de moellons et au béton armé.

9.2.1.4 Rideau de palplanches

Sur un site, la mise en place d'un rideau de palplanches a été préféré à la construction d'un muret profondément fondé. Ce choix tient à des raisons géotechniques. Le coût linéaire rejoint, à hauteur hors sol équivalente, le coût des murets en béton fondés sur des profondeurs d'environ 1 m.

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Palplanches	1	1200 (hauteur de 1 m hors fondations)	Opération menée sur le secteur Est de Loix sur l'île de Ré.

9.2.2 Coûts observés sur les opérations de confortement ou de rehausse

Seules deux opérations de nature sensiblement différente apparaissent dans cette rubrique.

Murs et ouvrages de soutènement – Travaux de confortement ou de rehausse					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Rehausse muret en béton et barrières anti-submersion	1	500 (hauteur de 1,0 m hors fondations)	NA	NA	NA
Confortement falaise par structure en béton et reconstruction parement maçonné	1	NA	290 (maçonnerie)	800 (béton injecté et ancré)	NA

La première opération s'inscrit dans le cadre de l'aménagement des rives de l'étier du Pouliguen. Le choix de rehausser un ouvrage existant réduit sensiblement le coût linéaire de l'aménagement (500 €/ml contre au minimum 1 000 €/ml dans le cas d'une construction neuve). Le coût de 500 €/ml intègre les travaux de VRD associés, sans lesquels le coût linéaire de l'ouvrage est de 370 €/ml.

La seconde opération est très atypique puisqu'elle combine, en partie inférieure, un confortement de falaise par une structure en béton et, en partie supérieure, la reconstruction d'un parement maçonné. Étant donné la géométrie irrégulière de l'aménagement, la définition d'un coût linéaire n'est pas pertinente. Nous nous limitons donc à donner des indications sur le coût surfacique de la maçonnerie et sur le coût volumique du béton.

9.2.3 Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation

Murs et ouvrages de soutènement – Travaux d'entretien ou réparation					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m ²)	Coût volumique (€/m ³)	Coût massique (€/t)
Muret en maçonnerie	1	130 (hauteur de 2 à 3 m hors fondations)	100 (maçonnerie)	NA	NA
Reconstitution de gabions disloqués	1	765 (hauteur de 1 m)	765 (parement de gabions)	NA	NA

Les deux opérations recensées ont été conduites à la suite de Xynthia. La première consiste en des travaux ponctuels (reprise parapet manquant, épaulement arrière par matériaux argileux, reprise et rejointoiement de maçonnerie) et n'appelle pas de commentaire particulier quant à son coût linéaire global et au coût surfacique des travaux de maçonnerie.

La seconde consiste en la reconstitution de gabions disloqués à Sainte-Marie-de-Ré (17). La fourniture et la mise en œuvre des cages d'armatures représentent l'essentiel des dépenses. Son coût paraît élevé au regard des autres opérations (765 €/m² contre 150 €/m² dans le cas de la réparation des digues avec parement). L'exposition aux vagues a peut-être pu justifier un dimensionnement supérieur des armatures. L'illustration 70 représente un rempart constitué de gabions sur un autre site exposé : la digue de la Loge du Guet à Ars-en-Ré (17).



Illustration 70 : gabions surplombant la digue de la Loge du Guet à Ars-en-Ré (17)
(source : www.notre-ile-de-re.com)

9.3 COÛTS OBSERVÉS SUR LES ÉPIS

Les opérations recensées visent d'une part à la construction, la reconstruction ou la réfection, et d'autre part à la réparation des ouvrages. Aucune opération ne s'apparente à un confortement de ces structures.

9.3.1 Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection

Épis - Travaux de construction (y compris prolongement)					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Enrochements	4	700<1200<1900 (hauteurs 1,5 à 2,0 m)	NA	NA	26<31<37 (enrochements)
	2	3600<3800<4000 (hauteurs 3 à 4 m)			
Bois - Construction formant un écran (poteaux et planches)	2	650 (hauteurs de 3 m y compris fondation)	NA	1700 (bois)	NA
Bois - Construction formée de pieux de diamètre 0,30 m et espacés de 0,6 m	1	400 (hauteur de 6 m dont 4 m dans le sol)	NA	660 (bois)	NA
Géocomposite injecté de sable (largeur 2 m)	1	2060 (hauteur de 1,70 m dont 1 m d'ancrage)	NA	NA	NA

Deux types de construction alternative aux enrochements ont été étudiés : les ouvrages en bois et les ouvrages constitués d'un géocomposite injecté de sable.

À hauteur équivalente, les ouvrages en bois présentent un coût inférieur aux ouvrages en enrochements.

L'ouvrage en géocomposite injecté de sable d'une hauteur totale de 1,70 m (en tenant compte de la hauteur d'ancrage) se situe dans le haut de la fourchette de coûts des ouvrages en enrochements (à hauteur équivalente).

9.3.1.1 Construction en enrochements

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Enrochements	4	700<1200<1900 (hauteurs 1,5 à 2,0m)	Ces deux catégories correspondent à des épis avec et sans noyau.
	2	3600<3800<4000 (hauteurs 3 à 4 m)	

En construction, les valeurs qui ressortent sur les ouvrages en enrochements sont cohérentes avec les deux classes de hauteur définies.

Les deux ouvrages de plus grandes dimensions (hauteurs de 3 à 4 m) sont situés aux Saintes-Maries-de-la-Mer et à Capbreton. Contrairement aux autres ouvrages, ils disposent d'un noyau de tout-venant.

Enrochements :

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	4	masse mise en œuvre (t)	26<31<37	Une valeur de 94€/t recensée sur le littoral aquitain.

Les valeurs observées sur les enrochements sont assez resserrées, excepté sur une opération concernant le littoral aquitain (dans le tableau ci-dessus, le coût volumique de 94 €/t n'a pas été pris en compte dans la définition de la valeur haute et dans le calcul de la valeur moyenne).

9.3.1.2 Construction en bois

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Bois - Construction formant un écran (poteaux et planches)	2	650 (hauteurs de 3 m y compris fondation)	Opérations réalisées sur des longueurs de 100 à 200 m. 1300 €/ml pour une troisième construction couplée à un rechargement de sable.
Bois - Construction formée de pieux de diamètre 0,30 m et espacés de 0,6 m	1	400 (hauteur de 6 m dont 4 m dans le sol)	Opération réalisée sur une longueur de 2800 m.

Deux types de construction ont été recensées : en Vendée et dans le Calvados, les épis ont été construits avec un assemblage de poteaux et de planches (cf. Illustration 71), tandis que dans le Nord, la construction n'est constituée que de files de pieux faiblement espacés. Ce dernier principe de construction est appliqué sur un grand linéaire (2 800 m) en complément de la réfection de la digue de Sangatte. Le coût linéaire de ces alignements de pieux est de 400 €/ml. Le coût linéaire de l'assemblage de poteaux et de planches est sensiblement supérieur.

Les coûts volumiques de ces deux techniques font l'objet d'un comparatif dans le tableau ci-après.

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m³)	Observations
Assemblage de poteaux, planches, liernes	1	volume de bois (m³)	1700	Pièces en chêne.
Alignements de pieux	1		660	Pieux en chêne.

La mise en œuvre de pieux est relativement peu coûteuse, car la forme des pièces impose peu de contraintes au niveau de la ressource et leur mise en œuvre est simple (pas d'assemblage). Dans le cas où la formation d'un écran continu n'est pas recherchée, cette solution paraît avantageuse économiquement. La durabilité de cette solution a également été éprouvée sur le site de Sangatte puisque les pieux viennent en remplacement de pieux en chêne dont la pose date d'environ un siècle (cf. Illustration 72). Bien qu'un certain nombre d'entre eux aient basculé ou aient rompu après avoir été utilisés par les vagues et par le sable, la majorité était encore en fonctionnement après une si longue durée de service.

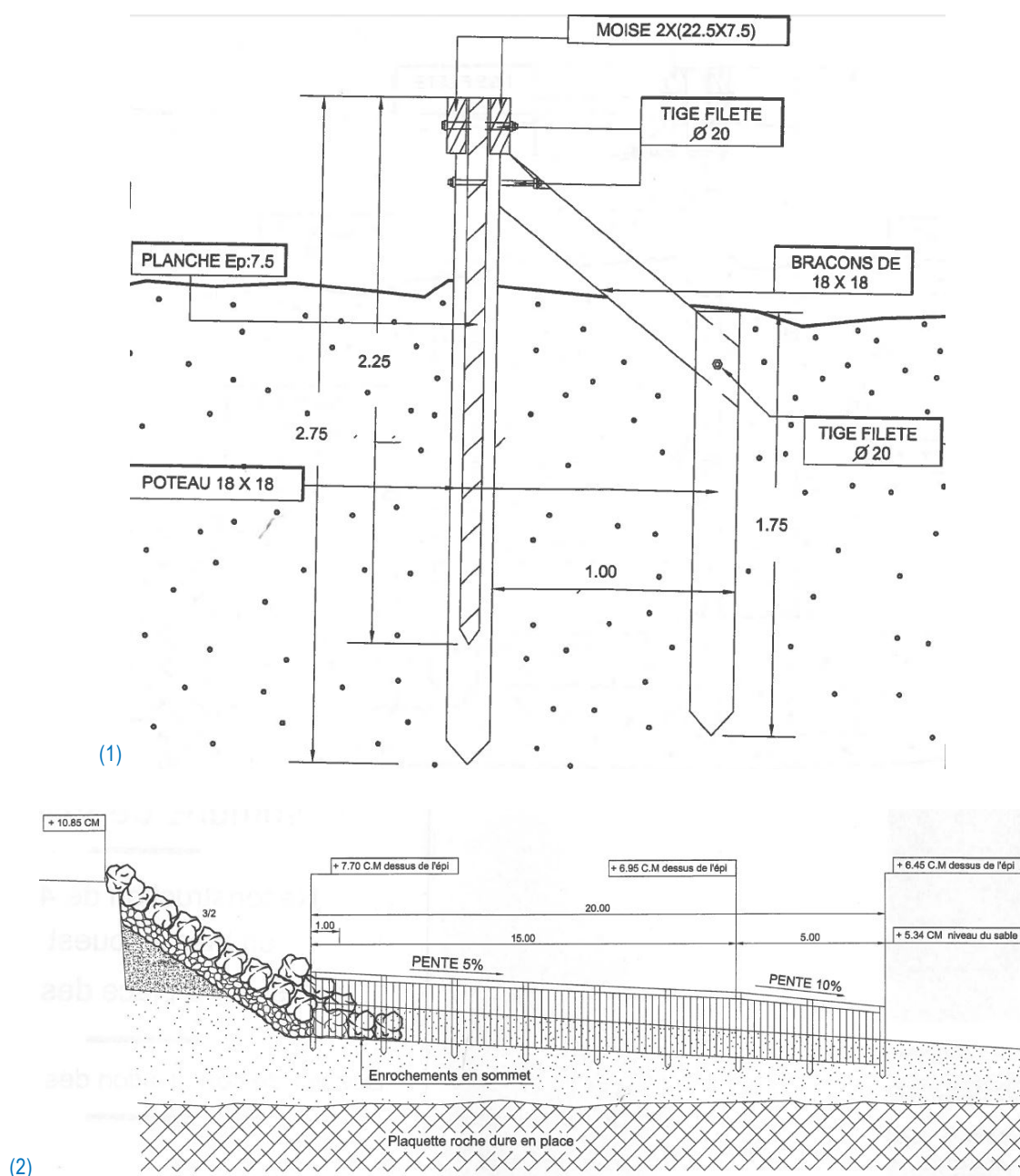


Illustration 71 : épis constitués par assemblage, coupe-type (1) et élévation (2)
(source : Conseil départemental du Calvados)



Illustration 72 : épis en cours de remplacement, vue générale du chantier (1) et mise en fiche d'un pieu (2)
(source : DDTM62)

9.3.1.3 Géocomposite injecté de sable

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Géocomposite injecté de sable (largeur 2 m)	1	2060 (hauteur de 1,70 m dont 1 m d'ancrage)	Ancrage sur 1 m de profondeur

Une seule opération de création d'épis utilisant un géocomposite injecté de sable a été recensée à Plobannalec-Lesconil (29) ; elle consiste en l'implantation de cinq épis de type Stabiplate® (longueur 35 m, espacement 50 m).

9.3.2 Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation

Épis - Travaux de réparation					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Enrochements	4	315<675<970 (hauteurs 1 à 1,5 m)	NA	NA	11<19<27 (enrochements)
Terrassement et enrochements	2	1000<1150<1300 (hauteurs 3 à 4 m)	NA	10<14<19 (terrassement)	16<16,5<17 (enrochements)
Béton armé	2	630 (hauteurs 1 m)	NA	360<580<790 (béton armé)	NA

Les coûts d'entretien et de réparation apparaissent cohérents avec les coûts précédemment observés. En particulier, les coûts linéaires de réparation des ouvrages en enrochements sont inférieurs aux coûts de construction sur les deux classes de hauteur qui ont été définies. Le coût massique des enrochements est inférieur à celui rencontré sur la construction du fait de la remobilisation, du moins partielle, des matériaux.

Dans le cas des ouvrages de grande hauteur, le coût volumique des terrassements est relativement stable, ce qui s'explique par un réemploi des matériaux sur place (les deux opérations correspondent à des interventions suite à la tempête Xynthia).

Le coût de réfection des ouvrages en béton armé rejoint la valeur moyenne de la réfection des ouvrages en enrochements pour la classe de hauteur correspondante. Les deux opérations présentent des coûts linéaires équivalents mais s'écartent très sensiblement au niveau de leur coût volumique. Cet écart peut s'expliquer par des volumes sensiblement différents : 4 m³ (sur 5 m) pour l'opération au coût unitaire le plus élevé contre 58 m³ (sur 40 m) pour l'autre opération.

9.4 COÛTS OBSERVÉS SUR LES BRISE-LAMES EN ENROCHEMENTS OU EN GÉOTUBES

Dans cette section, nous étudierons le coût des brise-lames, ouvrages positionnés longitudinalement en bas d'estran. Dans le prolongement de cette section, d'autres ouvrages longitudinaux positionnés plus haut, à savoir en pied de dune ou en bas de plage seront étudiés.

Qu'il s'agisse de brise-lames ou de butées de pied, les techniques basées sur l'utilisation de géotubes (géocomposites injectés de sable) ont été largement expérimentées au cours des dix dernières années. Nous nous efforcerons de les comparer sur le plan économique avec les ouvrages « traditionnels » constitués d'un noyau de tout-venant protégé par une carapace d'enrochements.

9.4.1 Coûts observés sur les opérations de construction, reconstruction ou réfection

Brise-lames – Travaux de construction					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Enrochements	6	4200<6600<8800 (hauteurs de 4 à 6 m)	NA	NA	25<30<42 (enrochements)
Géocomposite injecté de sable sur une rangée, diamètre 1,5 à 1,8 m	1	500 (hauteur finale de 1,0 à 1,2 m)	NA	NA	NA
Géocomposite injecté de sable sur deux rangées, diamètre 1,5 à 1,8 m	1	1300 (hauteur finale de 1,0 à 1,2 m)	NA	NA	NA
Géocomposite injecté de sable sur deux rangées, diamètre 4 à 5 m	2	2100<2300<2500 (hauteurs finales de 2,5 à 3,0 m)	NA	NA	NA

Les opérations de construction de brise-lames en enrochements se répartissent sur le littoral de Méditerranée et sur le littoral atlantique, tandis que les ouvrages en géotubes se concentrent sur le littoral de Méditerranée.

La hauteur des brise-lames en géotubes est toujours inférieure à celle des ouvrages en enrochements. Néanmoins, les plus grands ouvrages en géotubes atteignent jusqu'à 3,0 m de hauteur et approchent ainsi les plus petits ouvrages en enrochements (hauteur de 4,0 m). En considérant ce cas où l'écart de hauteur est relativement réduit, la différence de coût entre ces deux options est nette (coût minimum de 4 200 €/ml pour les enrochements contre un coût maximum de 2 500 €/ml pour les géotubes).

9.4.1.1 Construction en enrochements

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Enrochements	6	4200<6600<8800 (hauteurs de 4 à 6 m)	Un coût de 13600 €/ml est enregistré sur un ouvrage dont la hauteur varie de 2 m à l'enracinement à 7 m au musoir.

Le coût linéaire des brise-lames en enrochements est directement lié à leur hauteur, même si l'on constate que la variation du coût des enrochements peut légèrement perturber cette correspondance.

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	6	masse mise en œuvre (t)	25<30<42	Coût de 42 €/t observé sur l'une des deux opérations de Châtelailon. (29 €/t pour l'autre opération.)

L'Illustration 73 présente la construction d'une série de brise-lames assurant une première ligne de défense sur le littoral de Châtelailon-Plage (17)



Illustration 73 : brise-lames en protection des Boucholeurs : ouvrages en construction (1) et achevés (2)
(source : Silycaf)

9.4.1.2 Construction en géocomposites injectés de sable

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Géocomposite injecté de sable sur une rangée, diamètre 1,5 à 1,8 m	1	500 (hauteur finale de 1,0 à 1,2 m)	
Géocomposite injecté de sable sur deux rangées, diamètre 1,5 à 1,8 m	1	1300 (hauteur finale de 1,0 à 1,2 m)	Tapis anti-affouillement de 10,50 m tenus par deux petits boudins.
Géocomposite injecté de sable sur deux rangées, diamètre 4 à 5 m	2	2100<2300<2500 (hauteurs finales de 2,5 à 3,0 m)	Deux lignes de largeur totale 10 à 12 m.

Les géotubes peuvent être positionnés en une seule file ou en « double file ». Ces ouvrages sont posés sur des tapis anti-affouillement de grande largeur, également en géotextile tissé. Le coût linéaire des ouvrages varie logiquement selon la taille des tubes et leur disposition en une ou en deux files.

L'illustration 74 montre, en premier plan, la disposition des géotubes sur deux files en protection d'une portion du lido de Sète à Marseillan.



Illustration 74 : géotubes immergés en protection d'une portion du lido de Sète à Marseillan
(source : Thau Agglo)

9.4.2 Coûts observés sur les opérations de confortement

Brise-lames – Travaux de confortement					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Enrochements	1	2800 (hauteur de 4,5 m)	NA	NA	34 (enrochements)

Une seule opération de confortement a été recensée, réalisée à Châtelailon-Plage dans le cadre d'une opération globale intégrant par ailleurs la construction de deux brise-lames et le confortement d'une digue.

En comparaison des travaux de construction d'ouvrages neufs, l'intervention sur un ouvrage existant a conduit à une légère augmentation du coût des enrochements comme précisé dans le tableau ci-après.

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	1	masse mise en œuvre (t)	34	Les conditions d'intervention pour le reprofilage conduisent à une augmentation du prix de pose de 10€ (construction) à 12€ (reprofilage).

9.4.3 Coûts observés sur les opérations d'entretien ou de réparation

Bien que des réparations aient été menées sur des géotubes, le coût de celles-ci s'exprime davantage en fonction du nombre d'interventions et de leurs durées qu'en fonction d'un linéaire. C'est pourquoi dans le tableau de synthèse ci-après nous nous limitons à évoquer les interventions sur les ouvrages en enrochements. Toutefois nous pourrions apporter quelques précisions sur le coût de réparation (ainsi que sur le coût des opérations de contrôle) des géotubes dans la suite de cette rubrique.

Brise-lames – Travaux de réparation					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Enrochements et béton – réparations ponctuelles	1	440 (hauteur de 4 m)	NA	220 (béton)	49 (enrochements)

9.4.3.1 Réparation des brise-lames en enrochements

Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire global (€/m)	Observations
Enrochements et béton – réparations ponctuelles	1	440 (hauteur de 4 m)	Opération réalisée à Soulac-sur-Mer (33)

L'opération étudiée consiste en une reprise de brèches, en une réfection du couronnement de l'ouvrage par du béton et en la pose de blocs d'enrochements sur le talus. En comparaison du coût linéaire de construction d'un tel ouvrage, le coût de cette opération de réparation est de l'ordre de 10 %.

L'étude détaillée du prix des matériaux montre que le béton présente un coût volumique relativement faible tandis que les enrochements sont par contre d'un prix très élevé, ce qui peut s'expliquer par le contexte géologique du bassin sédimentaire aquitain.

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût volumique (€/m³)	Observations
Béton	1	volume de béton (m³)	220	Renforcement du corps de l'ouvrage avec 1000 m³ de béton.

Technique	Nombre d'opérations recensées	Unité	Coût massique (€/t)	Observations
Enrochements	1	masse mise en œuvre (t)	49	Difficulté d'approvisionnement en enrochements dans le bassin aquitain.

9.4.3.2 Surveillance et réparation des brise-lames en géotubes

Les géotubes sont vulnérables aux quilles et hélices des bateaux ainsi qu'au bois déplacé lors des tempêtes, éléments susceptibles de provoquer des déchirures.

Les gestionnaires d'ouvrages doivent donc prévoir des actions de surveillance. Ainsi la ville de Cannes dispose d'un marché à bons de commande prévoyant deux plongées de contrôle par an pour un montant annuel de 3 000 € HT. Le coût recueilli auprès de la ville d'Hyères est du même ordre de grandeur : 1 700 € HT par plongée de contrôle.

En cas de légère déchirure, la réparation peut s'effectuer par « rapiéçage » sur une journée. Les coûts relevés pour ce type d'intervention sont :

- de 1 600 € HT pour un géotube de hauteur 1 m à Hyères (une seule intervention en 2014) ;
- de 2 000 € HT pour un géotube de hauteur 2,5 m à Cannes (cinq interventions en 2013) ;
- de 1 300 € HT pour un géotube de hauteur 3,0 m à Sète (trois interventions sur des surfaces de 6 m² en 2013/2014).

Une déchirure plus importante peut nécessiter le remplacement d'un élément. La dépose de l'élément déchiré et la pose d'un nouvel élément sont d'un coût linéaire légèrement supérieur à celui de la première réalisation. Ces opérations, qui portent sur des éléments d'environ 50 m, ont été réalisées :

- une fois en deux ans à Hyères pour un montant de 30 185 € HT (tube de hauteur 1 m) ;
- une fois en trois ans à Cannes pour un montant de 100 000 € HT (tube de hauteur 2,5 m).

9.5 COÛTS OBSERVÉS SUR LES BUTÉES DE PIED EN ENROCHEMENTS OU EN GÉOTUBES

Les ouvrages formant butée, en bas de plage ou en pied de dune, utilisent les mêmes principes de conception que les brise-lames : ouvrages en enrochements ou en géocomposite injecté de sable.

Seuls des travaux de construction ont été recensés sur ces ouvrages.

9.5.1 Coûts observés sur les opérations de construction de butées de bas de plage

Butée de pied en bas de plage – Travaux de construction					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Enrochements	1	2900 (hauteur de 2,8 m)	NA	NA	58
Géocomposite injecté de sable	1	1650 (hauteur finale 2,4 m)	NA	NA	NA

Les deux opérations recensées concernent le même site, Valras-Plage (34). Pour des hauteurs relativement proches, on note un écart sensible entre les coûts associés aux deux techniques « enrochements » et « géocomposite injecté de sable ». L'écart est du même ordre de grandeur que celui observé sur les brise-lames entre ces deux options techniques.

À noter que le coût massique des enrochements est particulièrement élevé dans cette région et que l'écart pourrait être bien plus réduit dans des régions où les conditions d'approvisionnement seraient plus favorables.

9.5.2 Coûts observés sur les opérations de construction de butées de pied de dune

Butée en pied de dune – Travaux de construction					
Techniques employées	Nombre d'opérations recensées	Coût linéaire (€/m)	Coût surfacique (€/m²)	Coût volumique (€/m³)	Coût massique (€/t)
Géocomposite injecté de sable en pied de dune	2	1200<1400<1600 (hauteur finale de 1,0 m à 1,2 m)	NA	NA	NA

Deux opérations de construction ont été recensées à Treffiagat (29) et à Capbreton (40). La hauteur finale des ouvrages est de 1,0 m à 1,2 m hors ancrage. Malgré sa hauteur hors sol relativement faible, le dispositif d'ancrage (cf. Illustration 75) augmente le coût de l'ouvrage.

L'ouvrage de Tréffiagat, construit en 2010, a été détruit par une tempête en janvier 2014 [Emmanuel Blaise *et al.*, 2015].

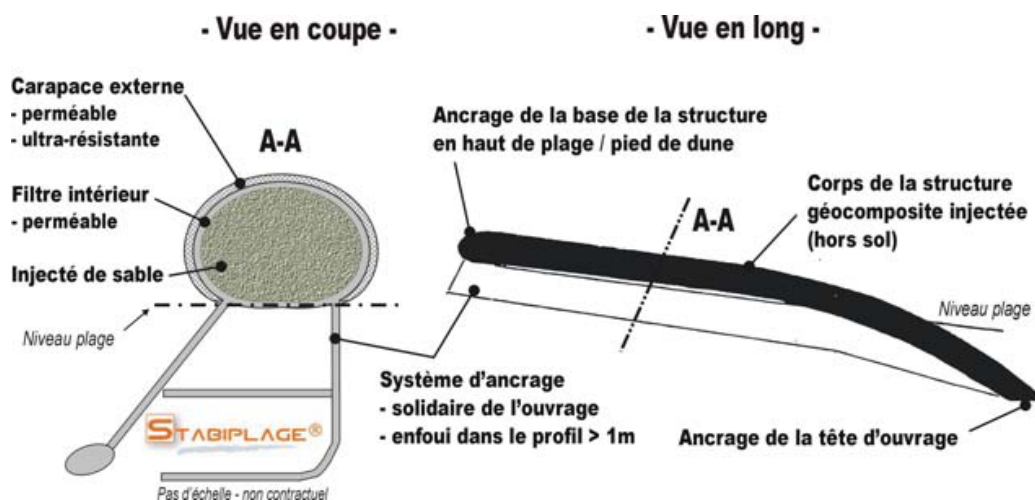


Illustration 75 : coupe transversale et longitudinale d'un Stabiplace® avec ancrage

9.6 DÉPENSES LINÉAIRES ANNUELLES MOYENNES EN GESTION ET ENTRETIEN OBSERVÉES SUR LES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

Pour les mêmes raisons que celles exposées sur les digues (cf. section 8.5), nous nous limiterons pour les ouvrages de génie civil à l'évaluation des coûts moyens annuels d'entretien et de gestion, en considérant que l'évaluation d'un coût moyen annuel d'investissement n'a guère de sens dans le contexte mouvementé de la décennie passée. Comme pour les digues, deux modes d'évaluation peuvent être envisagés pour calculer les dépenses annuelles linéaires :

- calcul sur la base des budgets de gestion et d'entretien des parcs ;
- calcul d'un pourcentage du coût d'investissement.

9.6.1 Exploitation des budgets d'entretien et de gestion

Les ouvrages de génie civil ont des fonctions très diverses (perrés, murs et ouvrages de soutènement, épis, brise-lames, butées) et présentent une grande variété dans leur conception et leurs dimensions. Rapporter à un linéaire les dépenses consacrées à l'entretien et à la gestion d'un parc d'ouvrages revient donc à établir une moyenne sur des objets hétérogènes. Nonobstant cette réserve, sur la base de l'exercice mené en section 8.5.1.1 sur le parc d'ouvrages de génie civil de l'île de Noirmoutier, une fourchette large peut être donnée à titre indicatif :

- dépenses linéaires annuelles d'entretien, hors coûts de gestion, comprises entre 2 200 et 12 500 €/km/an avec une moyenne observée autour de 4 400 €/km/an ;
- en y ajoutant les frais de gestion, les dépenses linéaires annuelles de gestion et d'entretien peuvent être estimées entre 4 400 et 16 300 €/km/an, avec une moyenne autour de 6 700 €/km/an.

S'agissant d'ouvrages de 2 à 4 m de hauteur, la valeur maximum obtenue, 16 300 €/km/an, est cohérente avec la valeur observée dans [Cerema, 2014] sur les perrés maçonnés de hauteur moyenne 6 m gérés par le Symadrem à Arles : 32 000 €/km/an.

9.6.2 Évaluation des dépenses d'entretien en pourcentages du coût d'investissement

Ce calcul ne concerne que les dépenses d'entretien à l'exclusion des dépenses de gestion qui, dans le cadre d'un projet classique de réfection ou de confortement, sont considérées comme prises en compte globalement à l'échelle du parc et à ce titre comme n'ayant guère d'impact dans un projet particulier (si cette hypothèse n'était pas vérifiée, l'approche développée dans la présente section pourrait être complétée par une estimation complémentaire des coûts de gestion).

Le calcul des coûts d'entretien comme pourcentage du coût d'investissement ne présente pas le même inconvénient que le mode d'évaluation précédent puisque l'on peut considérer les ouvrages séparément pour mener le calcul. Ce mode d'évaluation nécessite cependant d'apprécier assez finement les interventions que l'ouvrage est susceptible de nécessiter avant de déterminer les coûts induits par ces interventions.

Nous concluons cette section en confrontant nos analyses aux chiffres figurant dans des références bibliographiques.

9.6.2.1 Types d'intervention sur les ouvrages

Sur le premier point, à l'exception de certaines opérations régulières de rejointoiement de maçonnerie ou de ragréage de béton armé, les interventions d'entretien sur les ouvrages existants s'opèrent en réponse à des dégradations générées par des tempêtes. Ces dépenses sont donc le plus souvent occasionnelles. Les techniques d'intervention dépendent par ailleurs du type de construction et des désordres subis. L'étude entreprise dans les sections précédentes sur les coûts des interventions particulières donne un aperçu des modes d'intervention associés à chacun des ouvrages. En particulier, les tableaux de synthèse montrent que :

- sur les **ouvrages en enrochements** (ou en gabions), des opérations de réparation et de confortement sont entreprises après les tempêtes. Les situations sont très différentes suivant les types d'ouvrages :
 - sur les perrés, les opérations de confortement recensées présentent des coûts équivalents à ceux de la construction du fait des quantités importantes de matériaux utilisées. Il n'existe que très peu d'interventions de réparation ;
 - sur les épis, des interventions en réparation sont menées. Lorsqu'elles concernent les épis de petite taille, leur coût est équivalent à celui de leur construction. Lorsqu'elles concernent des ouvrages de grande taille (avec noyau), leur coût est de l'ordre de 20 à 30 % de celui de la construction ;
 - sur les brise-lames, la situation est assez proche de celle des grands épis : on observe des opérations de réparation et des opérations de confortement dont les coûts sont respectivement de l'ordre de 10 % et 50 % du coût de construction ;
- sur les **ouvrages en béton et maçonnerie**, les opérations recensées consistent soit en une reconstruction soit en des travaux lourds de confortement (palplanches et longrine en béton en pied d'ouvrage, rejointoiement du parement et reprise des parapets). Leur coût est équivalent, voire supérieur, à des coûts de construction ;
- sur les **géocomposites** injectés de sable, le retour d'expérience sur les dernières années indique que des opérations régulières de surveillance et de réparation sont nécessaires.

Le remplacement d'un, voire de deux géotubes (ce qui représente entre 5 et 20 % du nombre de géotubes sur les ouvrages concernés), a même été réalisé alors que ces ouvrages avaient moins de trois ans. Sur des durées de l'ordre de 3 ans, les coûts cumulés de surveillance et de réparation (voire grosse réparation en cas de remplacement d'un géotube) sont compris entre 10 et 25 % du coût de construction, soit 3 à 8 % par an ;

- sur les **ouvrages en bois**, les ouvrages offrent une très bonne tenue dans le temps, en particulier pour les épis constitués d'un alignement de pieux disjoints. L'exemple de Sangatte montre la possibilité de construire un ouvrage dont la durée de vie est d'environ cent ans sous réserve de prévoir des interventions destinées à remplacer des pièces défaillantes. Cependant, le nombre de pieux d'origine montre que ces interventions sont très espacées et peu conséquentes.

9.6.2.2 Coûts induits par les interventions

Pour rechercher un compromis entre le coût et la performance (ou la sûreté) des ouvrages, les hypothèses classiquement adoptées en phase de conception conduisent à rechercher une absence de désordres pour des tempêtes dont l'occurrence est décennale à trentennale et à tolérer des désordres, tout en exigeant une conservation de la performance, pour des événements plus rares (par exemple pour un événement centennal). Ces exigences varient cependant en fonction des enjeux que protège l'ouvrage et également de son accessibilité et de sa réparabilité. Cette logique transparaît clairement dans l'échantillon d'interventions étudiées lorsqu'il s'agit **d'enrochements ou de géocomposite** :

- les petits ouvrages (épis, brise-lames en géotubes) subissent des désordres pour des événements fréquents et doivent être reconstruits ou remplacés partiellement pour des événements plus rares. Les dépenses occasionnées s'inscrivent donc dans un cycle relativement court : des interventions de réparation plus ou moins régulières et la nécessité d'une reconstruction après une durée de l'ordre de trente ans ;
- sauf tempête exceptionnelle, les perrés, épis et brise-lames de grandes dimensions ne subissent en général pas de désordres si importants qu'ils doivent être reconstruits : ils sont réparés (ou confortés) avec des dépenses de l'ordre de 10 à 50 % du coût de construction selon l'intensité de la tempête et avec une périodicité de l'ordre de vingt ou trente ans. La stratégie de confortement successif que permet le rechargement en enrochements tend, en règle générale, à accroître la sûreté de l'ouvrage au fil du temps.

S'agissant des ouvrages utilisant le **béton armé ou les palplanches**, la logique d'adapter la performance et la sûreté de l'ouvrage aux enjeux qu'il protège et à la capacité d'intervenir sur cet ouvrage pour le conforter ou le réparer est nettement moins évidente. La première raison en est bien sûr que ces ouvrages ne sont ni déformables, ni facilement réparables. Les seules interventions de confortement recensées visaient à pourvoir de fondations en palplanches et d'une longrine en béton un ouvrage dont les anciennes fondations en bois étaient considérées comme trop fragiles (perrés de la Guérinière sur l'île de Noirmoutier). Les autres interventions consistent en des reprises de maçonnerie et en des injections de béton, dont le coût peut rejoindre celui de la construction.

Sur les ouvrages en **bois**, nous avons vu que lorsque leur constitution est simple et robuste, notamment dans le cas d'un alignement de pieux, les coûts d'entretien sont nettement inférieurs aux coûts observés sur les autres types d'ouvrages.

9.6.2.3 Confrontation aux références bibliographiques et proposition d'estimation des dépenses d'entretien

Pour mieux quantifier les dépenses annuelles d'entretien associées aux différents types d'ouvrages, deux références bibliographiques ont été consultées :

- sur la base d'un parc de 113 ouvrages de génie civil situés en Camargue, les coûts de construction et d'entretien ont été comparés et il en est ressorti que les dépenses de gestion et d'entretien consacrées à ces ouvrages représentaient de 3 à 5 % de leur coût de construction [EID, 2013] ;
- si l'on se réfère à la littérature étrangère, dans le cadre de la définition de la stratégie de protection des côtes de Californie contre les effets du changement climatique, [Heberger et al., mai 2009] estime que les coûts annuels d'entretien des ouvrages de génie civil sont compris entre 1 et 4 % des coûts de construction.

Au vu de ces deux estimations, des valeurs comprises entre 1 et 5 % semblent pouvoir être retenues par défaut, la valeur de 1 % pouvant être octroyée aux ouvrages les plus simples et facilement réparables et la valeur de 5 % aux ouvrages qui ne possèdent pas ces qualités.

Nous suggérons donc de retenir :

- **pour les ouvrages en bois de constitution simple : 1 %;**
- **pour les ouvrages en enrochements et pour les murs en béton non armé : 2 à 3 %;**
- **pour les ouvrages de maçonnerie, de béton armé et de palplanches : 4 à 5 %.**

Dans tous les cas, un projet devrait comporter une analyse de sensibilité sur la part des dépenses consacrées à l'entretien ainsi que sur le taux d'actualisation pour mieux s'assurer de sa rentabilité à long terme.

Le cas des dépenses consacrées à la digue de Sangatte, avant qu'elle ne soit reconstruite, est présenté dans l'encadré ci-après, car il illustre les difficultés que soulève un ouvrage de génie civil dont l'état général n'est plus satisfaisant au regard des enjeux qu'il protège.

Coûts associés à un ouvrage de génie civil dégradé – Exemple de la digue de Sangatte

Entre 2013 et octobre 2014, cet ouvrage d'une longueur totale de 2 370 m (950 m en maçonnerie et 1 420 m en béton) et dont l'état était dégradé, a subi sept interventions d'urgence pour un coût total de 108 k€ et une opération d'entretien pour 234 k€, soit un total de 342 k€. Cet ouvrage a fait l'objet en 2017 d'un chantier de reconstruction (perré en enrochements) estimé à 10,3 M€ HT.

En limitant au maximum les dépenses d'entretien et de réparation dans la perspective de la reconstruction, les dépenses afférentes représentent sur deux ans 3,28 % du coût de la réfection, soit une dépense annuelle de l'ordre de 1,6 %. Ce chiffre aurait été acceptable si ces dépenses avaient permis d'atteindre une protection jugée suffisamment performante. Mais tel n'a pas été le cas. Ces dépenses n'ont fait que retarder la dégradation de la structure. C'est pourquoi le chantier de reconstruction a été entrepris.

10. Analyse transversale des coûts observés sur les différents types d'intervention

10.1 OBJET DE CETTE SYNTHÈSE

Cette partie propose de rassembler dans des cadres appropriés :

- les coûts globaux des opérations. Ces coûts sont systématiquement des coûts linéaires. Les différents types d'aménagement font l'objet de tableaux communs restituant les coûts apparaissant en construction, en confortement ou en entretien ;
- les coûts relatifs aux différentes techniques et matériaux. L'étude présente successivement les techniques dont le coût est exprimé en rapport avec :
 - la surface : maçonnerie, béton armé ;
 - le volume : sable, terre, béton armé et gabions ;
 - la masse : les enrochements.

Cette synthèse permettra de mieux comprendre comment les coûts évoluent en fonction du type d'aménagement, des modes d'intervention et des techniques.

Il doit être noté que si le grand nombre de catégories adoptées pour la classification des opérations a eu pour contrepartie dans la présentation des coûts observés de réduire la taille des échantillons, les analyses de la présente partie ne souffriront plus du même inconvénient. Pour les coûts associés aux techniques, l'augmentation de la taille des échantillons et la mise en perspective de la dispersion des valeurs observées en fonction des conditions de mise en œuvre sont particulièrement intéressantes pour mieux appréhender les incertitudes (dans les tableaux présentés dans cette section, la lettre N représente le **nombre d'opérations recensées**).

Enfin, il doit être rappelé que le coût n'est qu'un élément parmi d'autres quand il s'agit de déterminer la technique la plus appropriée. Il doit également être tenu compte :

- de la faisabilité technique ;
- des performances vis-à-vis du problème à traiter ;
- de la durabilité ;
- de l'entretien (dégradations prévisibles et possibilité de réparer, coûts liés aux interventions d'entretien, de réparation ou de confortement).

La comparaison des coûts par technique n'est donc qu'un critère de choix parmi d'autres.

10.2 SYNTHÈSE DES COÛTS GLOBAUX

Avant d'engager cette partie avec l'analyse des coûts globaux rapportés au linéaire d'ouvrages, nous rassemblons ici les résultats obtenus en parties 4 et 5 sur les coûts rapportés au linéaire de côte dans le cadre des projets s'inscrivant dans les stratégies de « gestion du trait de côte » ou de « protection contre les submersions marines » :

	Coût linéaire (M€/km)
Gestion du trait de côte	1<2,5<5 (opération « simple » sans volet terrestre ni brise-lames)
	4<6<7,5 (opération « complexe » avec volet terrestre ou brise-lames)
Protection contre les submersions marines	0,5<0,7<1 (site abrité des vagues)
	1<2<7,5 (site exposé aux vagues)

Abstraction faite des opérations de protection contre les submersions marines sur les sites abrités des vagues, il apparaît que **les valeurs hautes sont équivalentes sur les deux stratégies. Les valeurs moyennes sont supérieures sur la gestion du trait de côte.**

Dans la suite de cette section, nous considérons le linéaire d'ouvrages et non le linéaire de côte. Ceci appelle les commentaires suivants s'agissant des épis et des brise-lames :

- les épis sont plus ou moins longs suivant la pente de l'estran et suivant le marnage. Mais en général leur espacement est sensiblement égal à leur longueur. Sur la base des exemples recensés, nous pouvons considérer que le ratio est de 1. Dans le cas de la protection des territoires littoraux en Occitanie [Cete Méditerranée, mars 2011], il est considéré la mise en place d'épis de 100 m de long espacés de 100 m (associée à un rechargement de plage de 50 m³/ml) ;
- les brise-lames sont en général séparés d'une distance approximativement égale à leur longueur. Le linéaire de côte qui bénéficie de ce dispositif est donc double du fait de l'espacement entre chaque structure.

Pour notre synthèse, les digues représentent des ouvrages qui peuvent être pris pour point de comparaison à plusieurs titres :

- ce sont les ouvrages les plus répandus et ceux dont l'échantillon est le plus étoffé (50 opérations sur les digues recensées et entre 14 et 20 pour les autres types) ;
- leur structure (corps de remblais avec ou sans parement) peut être comparée à celle des autres ouvrages dans leur globalité (pour les épis, brise-lames et butées) ou en ne considérant que la carapace (pour les perrés et dans une certaine mesure les ouvrages de soutènement principalement constitués d'un parement). Les murs en surplomb du sol (présentant deux côtés libres contrairement aux soutènements) sont distincts des digues sur le plan de leur structure mais comparables sur le plan fonctionnel puisqu'ils peuvent former une retenue d'eau et donc s'intégrer dans un système d'endiguement.

L'observation des coûts ayant mis en évidence les variations en fonction des hauteurs sur lesquelles sont effectuées les interventions, les rapprochements sont effectués en utilisant les classes correspondantes.

10.2.1 Coûts linéaires de construction, reconstruction ou réfection

Les coûts linéaires de construction, reconstruction ou réfection ont été relevés sur l'ensemble des types d'ouvrages, avec, pour chacun d'eux, plusieurs modes d'intervention. Nous les présentons ci-après dans un tableau en rassemblant dans les mêmes colonnes :

- les dunes et les digues (positionnées longitudinalement en haut d'estran, en surplomb par rapport au sol) ;
- les perrés et les murs et ouvrages de soutènement (idem mais sans être en surplomb) ;
- les épis (ouvrages positionnés transversalement sur l'estran) ;
- les brise-lames et butées (positionnés longitudinalement en bas d'estran ou sur l'estran).

Coûts globaux des opérations de construction, reconstruction et réfection (€/m)								
Dunes ET Digues (avec ou sans parement)		Perrés ET Murs et ouvrages de soutènement		Epis		Brise-lames ET Butées		
Type d'intervention (type d'ouvrage)	Coûts observés (et dimensions)	Type d'intervention (type d'ouvrage)	Coûts observés (et dimensions)	Type d'intervention (type d'ouvrage)	Coûts observés (et dimensions)	Type d'intervention (type d'ouvrage)	Coûts observés (et dimensions)	
Apport massif de sable (création cordon dunaire)	300<500<700	Enrochements (perré)	370 (hauteur 2 m)	Enrochements (épi)	700<1200<1900 (hauteurs 1,5 à 2,0 m)	Géocomposite injecté de sable sur une rangée, diamètre 1,5 à 1,8m (brise-lames)	500 (hauteur finale de 1,0 à 1,2 m)	
	N=4		N=1		N=4	N=1		
	220		650<750<900 (hauteurs 3 à 4 m)		3600<3800<4000 (hauteurs 3 à 4 m)	Géocomposite injecté de sable sur deux rangées, diamètre 1,5 à 1,8m (brise-lames)	1300 (hauteur finale de 1,0 à 1,2 m)	
Bourrelet d'amorçage (création cordon dunaire)	NA (Valeur calculée)	Enrochements (perré)	N=2	Enrochements (épi)	N=2	Géocomposite injecté de sable sur deux rangées, diamètre 1,5 à 1,8m (brise-lames)	N=1	
	420 (hauteur de 1,3 m y compris fondation)		1000<1100<1200 (hauteurs 4 à 6m)		650 (hauteurs de 3 m)		Géocomposite injecté de sable sur deux rangées, diamètre 4 à 5m (brise-lames)	2100<2300<2500 (hauteurs finales de 2,5 à 3,0 m)
	N=1		N=1		N=2		N=1	
Terrassement (digue)	900<1000<1200 (hauteurs de 2 à 3 m y compris fondation)	Béton (perré)	1600 (hauteur de 6 m)	Bois - Construction formée de pieux de diamètre 0,30 m et espacés de 0,6 m (épi)	400 (hauteur de 6 m dont 4 m dans le sol)	Enrochements (brise-lames)	4200<6600<8800 (hauteurs de 4 à 6 m)	
	N=3		N=1		N=1		N=1	
	2000<2500<3100 (hauteurs de 2 à 3 m)		1000<1300<2000 (hauteurs de 0,70 à 1,2 m hors fondations)		Géocomposite injecté de sable de largeur 2 m (épi)		2060 (hauteur de 1,70 m dont 1 m d'ancrage)	1200<1400<1600 (hauteur finale de 1,0m à 1,2 m)
Maçonnerie et injection de béton (digue)	N=2	Muret en béton avec anti-submersion avec fondations de 1m (mur et ouvrage de soutènement)	N=5	Géocomposite injecté de sable de largeur 2 m (épi)	N=1	Enrochements (butée en pied de plage)	N=2	
	1400<2300<3200 (hauteurs de 2 à 3,5 m)		1600 (hauteurs de 2 à 3 m)				2900 (hauteur de 3 m)	
	N=2		N=2				N=1	
Terrassement, matelas de gabions en drain interne et gabions en soutènement (digue)	1500 (hauteur de 2 m)	Muret en béton avec fondations superficielles (mur et ouvrage de soutènement)	100<165<210 (hauteurs de 0,50 à 0,7 m hors fondations)	Géocomposite injecté de sable de largeur 2 m (épi)		Géocomposite injecté de sable (butée en pied de plage)	1650 (hauteur finale de 2,4 m)	
	N=1		N=3				N=1	
	5600<5800<6000 (hauteurs de l'ordre de 8 m dont 1 à 2 m de butée de pied)		1200 (hauteur de 1 m hors fondations)					
Enrochements et superstructure en béton (digue)	N=2	Palplanches (mur et ouvrage de soutènement)	N=1					
	14300 (hauteur de 8 m)							
	N=1							
Béton armé sur remblais avec refends en palplanches (digue)								

Comparaison digues – dunes

À classe de hauteur équivalente (de 2 à 3,5 m), les digues sans parement présentent des coûts deux fois supérieurs aux dunes et les digues avec parement des coûts cinq fois supérieurs.

Comparaison digues – perrés

À classe de hauteur équivalente (entre 2 et 3 m), le coût des perrés en enrochements est cinq fois inférieur à celui des digues. Cet écart s'explique par le fait que la construction des digues implique une réalisation soignée du corps de digue ainsi que des travaux adjacents de voiries et réseaux divers (VRD). Dans ces conditions, la réalisation de la carapace extérieure de la digue (qui peut s'apparenter à un perré) ne représente qu'une part faible du montant total. Un écart de prix assez proche (rapport de 1 à 4) apparaît sur les grands ouvrages (hauteurs de 6 m hors butées de pied) entre les perrés en béton et les digues revêtues d'un parement en béton (si l'on considère la digue en béton armé sur remblais avec refends en palplanches, l'écart est même dans un rapport de 1 à 9).

Comparaison digues – murs et ouvrages de soutènement

À classe de hauteur équivalente (entre 2 et 3 m), le coût des murs et ouvrages de soutènement apparaît légèrement inférieur à celui de la construction d'une digue lorsque leur insertion dans les sites est simple (peu ou pas de travaux annexes). Néanmoins, il apparaît clairement au travers de nombreux exemples que la construction de murs de faible hauteur (de l'ordre de 1 m) sur des sites où des dispositions particulières doivent être prises pour leur intégration (fondations profondes, parements soignés, interruption du tracé par des barrières anti-submersion amovibles) présente des coûts équivalents à ceux des digues de hauteurs très supérieures. Plus précisément, en considérant pour les digues la classe de hauteurs de 2 à 3 m, le coût des murs et ouvrages de soutènement d'une hauteur proche de 1 m se situe entre le coût des digues sans parement et le coût des digues avec parement. Les murets de conception « plus légère » ont des coûts de cinq à dix inférieurs à ceux des murs bénéficiant de dispositions d'insertion particulières.

Comparaison digues – épis

Le coût linéaire des digues avec parement en enrochements est cohérent avec celui des épis : la hauteur des digues (de 2 à 3 m) s'inscrit dans le créneau intermédiaire des classes de hauteurs des épis avec (supérieur à 3 m) ou sans (inférieur à 2 m) noyau. Si la construction des épis sur les estrans n'est pas soumise aux contraintes de l'insertion dans des territoires aménagés, par contre les sollicitations hydrodynamiques, y compris en phase de construction, induisent des dispositions constructives et des modes d'exécution coûteux.

Les géocomposites injectés de sable présentent des coûts proches de ceux des épis en enrochements, seuls les épis en bois affichent des coûts sensiblement inférieurs.

Comparaison digues – brise-lames

Les brise-lames en enrochements, pour une classe de hauteurs de 4 à 6 m, présentent des coûts équivalents à des digues de hauteurs comprises entre 6 et 8 m. Les conditions de réalisation en mer de ces ouvrages expliquent leurs coûts élevés.

Les brise-lames en géotubes positionnés en deux rangées, à classes de hauteurs équivalentes (2 à 3 m), présentent des coûts de construction proches de ceux des digues avec parement en enrochements. Pour les petits brise-lames (hauteurs de 1 à 1,2 m) ne comportant qu'une seule rangée de géotubes, leur coût est équivalent à celui des digues sans parement de hauteur équivalente.

10.2.2 Coûts linéaires de confortement

Les coûts linéaires de confortement ont été relevés sur l'ensemble des ouvrages à l'exception des épis et des butées.

Coûts globaux des opérations de confortement (€/m)				
Dunes ET Digue (avec ou sans parement)	Perrés ET Murs et ouvrages de soutènement		Brise-lames	
Type d'intervention (type d'ouvrage)	Coûts observés (et dimensions)	Type d'intervention (type d'ouvrage)	Coûts observés (et dimensions)	Type d'intervention (type d'ouvrage)
Apport massif de sable en front de mer (dune)	250<290<320 N=3	Enrochements (perré)	800<2200<2900 (hauteurs de 3 à 6 m) N=4	Enrochements (brise-lames) 2800 (hauteur de 4,5 m) N=1
Intervention sur cordons dunaires intérieurs (dune)	100 N=1	Palplanches, béton et maçonnerie (perré)	1350<1600<1850 (hauteurs comprises entre 4 et 5 m) N=3	
Terrassement - Travaux « en continu » (digue)	250<260<300 (hauteurs de 2 à 3 m) N=2	Rehausse muret en béton et barrières anti-submersion (mur et ouvrage de soutènement)	500 (hauteur de 1,0 m hors fondations) N=1	
	500<550<600 (hauteurs de 3 à 4 m) N=2			
Terrassement - Travaux ponctuels (digue)	100<140<200 (hauteurs de 2,0 m environ) N=3			
Terrassement et enrochements - reprise générale du profil (digue)	840<1100<1400 (hauteurs de 3,5 à 5 m) N=3			
	250<275<310 (hauteurs variables de 2 à 7 m) N=3			
Terrassement et enrochements - rehausse (digue)				
Terrassement et béton (digue)	1500<1750<2000 (hauteurs de 3 à 5 m) N=2			
	900 (hauteur de 3 m) N=1			
Enrochements et mur en béton (digue)	1300<2100<2900 (hauteurs de 4 à 6 m) N=2			
	6000 (hauteur de 8 m) N=1			
Tunage et protection végétale (digue)	710 (hauteur de 3 m) N=1			

Comparaison digues – dunes

Les coûts de confortement observés sur les dunes marquant le trait de côte présentent des valeurs haute, basse et moyenne (valeurs resserrées entre 250 et 320 €/ml) très proches des valeurs observées sur les digues sans parement de petite hauteur (de 2 à 3 m). Les coûts observés sur les digues sans parement de hauteur supérieure (de 3 à 4 m) sont deux fois supérieurs.

Si l'on ne prend pas en compte les travaux ponctuels et de rehausse, les opérations de confortement menées sur les digues avec parement de hauteur 3 à 5 m présentent des coûts quatre à dix fois supérieurs (entre 1 000 et 3 000 €/ml) aux valeurs observées sur les dunes et sur les digues sans parement de faible hauteur.

Comparaison digues – perrés

Sur les perrés, les coûts observés en confortement par enrochements présentent la même valeur basse que sur les digues mais une valeur haute nettement supérieure du fait du rechargement massif en enrochements (entre 50 et 100 t/ml) opéré sur certaines opérations.

Comparaison digues – murs et ouvrages de soutènement

L'opération de rehausse de muret présente un coût nettement supérieur (500 €/ml) à celui de la rehausse des digues avec parement en enrochements (entre 250 et 310 €/ml), bien que ces dernières concernent des ouvrages de hauteurs supérieures, voire très supérieures (hauteurs variables de 2 à 7 m). Les interventions sur les murs en vue de leur rehausse nécessitent des techniques d'ancrage sur les ouvrages existants. Ces techniques sont plus coûteuses que celles employées pour la rehausse sur les digues (principalement addition de matériaux).

Comparaison digues – brise-lames

À hauteur équivalente, le coût de confortement d'un brise-lames apparaît deux fois supérieur à la valeur maximale observée sur les digues, à savoir 2 800 €/ml contre 1 400 €/ml. Le positionnement en bas d'estran des brise-lames et les difficultés d'intervention inhérentes expliquent ce fort écart.

10.2.3 Coûts linéaires d'entretien

Les coûts linéaires d'entretien et de réparation ont été relevés sur l'ensemble des ouvrages à l'exception des butées.

Coûts globaux des opérations de construction, reconstruction et réfection (€/m)						
Dunes ET Digue (avec ou sans parement)	Type d'intervention (type d'ouvrage)	Coûts observés (et dimensions)	Perrés ET Murs et ouvrages de soutènement		Epis	
			Type d'intervention (type d'ouvrage)	Coûts observés (et dimensions)	Type d'intervention (type d'ouvrage)	Coûts observés (et dimensions)
Apport de sable pour fermeture de cordon dunaire en urgence (dune)		70	Réfection de joints de liaison et injection de fissures (perré)	54	Enrochements	Enrochements et béton – réparations ponctuelles 440 (hauteur de 4 m) N=1
		N=1		N=1		
Terrassement (digue)		30<60<90 (hauteurs de 2,0 m environ)	Muret en maçonnerie (mur et ouvrage de soutènement)	130 (hauteur de 2 à 3 m hors fondations)	Terrassement et enrochements	315<675<970 (hauteurs 1 à 1,5 m) N=4 1000<1150<1300 (hauteurs 3 à 4 m) N=2
		N=3		N=1		
Terrassement et enrochements – Travaux « en continu » (digue)		420<460<540 (hauteurs de 2 à 3 m)	Gabion – Reconstitution de gabions disloqués (mur et ouvrage de soutènement)	765 (hauteur de 1 m)	Béton armé	630 (hauteurs 1 m) N=2
		N=2		N=1		
Terrassement et enrochements – Travaux ponctuels (digue)		20<100<250 (hauteurs de 1 à 4 m)		N=1		
		N=8				
Reprise de maçonnerie (digue)		1100 (hauteurs de 2 à 3 m)		N=1		
		N=1				
Pose de gabions (digue)		100<120<140 (hauteurs de 0,70 à 1 m)				
		N=2				
Béton sur parement maçonné (digue)		470 (hauteur de 2 m)				
		N=1				
Béton sur enrochements pour colmatage de brèches (digue)		620 (hauteur de 5 m)				
		N=1				

Comparaison digues – dunes

De même que pour les opérations de confortement, le coût de réparation observé sur les dunes (70 €/ml) est très proche de la moyenne des valeurs observées sur les digues sans parement de petite hauteur (2 m environ).

Les autres modes d'intervention sur les digues avec parement offrent peu de points de comparaison avec les dunes, si ce n'est pour conclure à des travaux d'entretien plus coûteux. Les « réparations ponctuelles » présentent un coût moyen légèrement plus élevé (100 €/ml) avec de très fortes fluctuations. Dans le cas le plus répandu de la réparation des digues présentant un parement en enrochements, sur des ouvrages de hauteurs légèrement supérieures (de 2 à 3 m), les coûts de réparation réalisés « en continu » sont cinq à dix fois supérieurs à ceux observés sur les dunes.

Comparaison digues – murs et ouvrages de soutènement

Les opérations de réparation menées sur les murs et ouvrages de soutènement offrent peu de points de comparaison avec celles menées sur les digues.

Comparaison digues – épis

Les coûts linéaires de réparation des épis apparaissent nettement supérieurs à ceux observés sur les digues avec parement en enrochements : pour des hauteurs de 1 à 1,5 m, leurs réparations sont d'un coût supérieur à celles des digues de hauteur 2 à 3 m (675 €/ml contre 460 €/ml) (un coût encore supérieur est logiquement relevé pour la réparation d'épis d'une hauteur supérieure).

Il en va de même pour les réparations employant comme principal matériau le béton : sur un épi de hauteur 1 m, le coût de réparation est de 630 €/ml contre :

- 470 €/ml pour le béton coulé sur le parement maçonné d'une digue de hauteur 2 m ;
- 620 €/ml pour le béton coulé sur la carapace en enrochements d'une digue de hauteur 5 m.

Les difficultés d'accès sur l'estran expliquent une nouvelle fois les écarts de coût.

Comparaison digues – brise-lames

S'agissant d'une opération consistant en des réparations ponctuelles, le coût linéaire observé sur le brise-lames de hauteur 4 m ne peut être comparé aux coûts linéaires des travaux « en continu » observés sur les digues. Si l'on établit une comparaison par rapport aux travaux ponctuels réalisés sur les digues de hauteurs 1 à 4 m présentant un parement en enrochements, le coût de réparation du brise-lames apparaît supérieur (440 €/ml contre une valeur maximale de 250 €/ml). Cette comparaison présente néanmoins certaines limites, dans la mesure où les linéaires de réparation effective ne peuvent être comptés précisément.

Pour répondre à ce type de situation, il convient de se référer aux coûts surfaciques, volumiques et massiques, sur lesquels nous revenons dans les sections suivantes.

10.2.4 Coûts linéaires annuels de gestion et d'entretien

Les coûts annuels de gestion et d'entretien sont récapitulés dans le tableau suivant :

	Dépense linéaire annuelle de gestion et d'entretien (€/km/an)	Pourcentage entretien/investissement
Dunes	0<500<1000 (Manche – Mer du Nord)	NA
	3500 (Atlantique)	NA
	5000 (Méditerranée)	NA
Digues	3000<4300<8800 (digue avec parement)	1 à 5 % (suivant état des ouvrages)
	6400<8600<12300 (digue sans parement)	2 à 10 % (suivant état des ouvrages)
Ouvrages de génie civil	4200<6700<16300 (à titre indicatif, sur la base des ouvrages de l'île de Noirmoutier)	1 à 5 % (suivant technique utilisée)

Si l'on exclut la façade Manche-mer du Nord sur laquelle les dunes ne nécessitent que peu d'interventions du fait des conditions climatiques favorables, les coûts linéaires annuels de gestion et d'entretien observés sur les dunes en façades atlantique et méditerranéenne sont proches de ceux des digues avec parement (valeur moyenne de l'ordre de 4 300 €/km/an). Les dépenses associées aux digues sans parement sont deux fois supérieures, avec une valeur moyenne de l'ordre de 8 600 €/km/an.

La cohérence des chiffres figurant dans le tableau ci-dessus peut être éprouvée en considérant les rapports entre les coûts d'investissement (construction, reconstruction et confortement) et les coûts annuels d'entretien. Selon les différents types d'ouvrages, il ressort que :

- pour les digues avec parement de hauteur 2 à 3 m (cas le plus répandu), en considérant une valeur moyenne de 2 000 €/ml pour la construction, reconstruction ou le confortement, un coût de gestion et d'entretien annuel de l'ordre de 50 €/ml correspond à 2,5 % du coût d'investissement, ce qui reste cohérent avec la fourchette de 1 à 5 % donnée pour l'entretien seul (on se situe donc dans le bas de la fourchette) ;
- pour les digues sans parement de hauteur 2 à 3 m (cas le plus répandu), en considérant une valeur moyenne de 500 €/ml pour la construction, reconstruction ou le confortement, un coût de gestion et d'entretien annuel de l'ordre de 10 €/ml correspond à seulement 2 %, ce qui est en deçà de la fourchette de 2 à 10 % donnée pour l'entretien seul. Pour atteindre le seuil de 2 %, il faudrait considérer pour ce type d'ouvrage qu'une part des opérations de rechargement et rehausse (en réponse à l'érosion et aux tassements) correspond à de l'entretien (et pas uniquement à du confortement) ;
- pour les ouvrages de génie civil, de hauteur 3 à 4 m (cas le plus répandu), en considérant une valeur moyenne de 3 000 €/ml pour la construction, reconstruction ou le confortement, un coût de gestion et d'entretien annuel de l'ordre de 100 €/ml correspond à 3,3 % du coût d'investissement, ce qui reste cohérent avec la fourchette de 1 à 5 % donnée pour l'entretien seul (on se situe donc également dans le bas de la fourchette).

Conclusion

Pour les digues avec parement et les ouvrages de génie civil, les coûts linéaires annuels de gestion et d'entretien observés sur des parcs d'ouvrages sont cohérents avec les pourcentages des dépenses d'investissement retenus dans les parties précédentes, bien que l'on se situe dans le bas de la fourchette.

Pour les digues sans parement, les coûts annuels d'entretien paraissent légèrement inférieurs aux pourcentages « normaux » des coûts d'investissement, ce qui peut correspondre soit à des politiques de gestion et d'entretien légèrement attentistes (ce que peut encourager une limitation des crédits), soit à une méthode de comptabilité qui, en définissant par convention les opérations de confortement comme de l'investissement, sous-estime la part réellement accordée à l'entretien. Cette dernière problématique avait déjà été abordée dans le volet fluvial de l'étude [Cerema, 2014].

10.3 SYNTHÈSE DES COÛTS PAR TECHNIQUE (OU MATÉRIAU)

Nous proposons dans cette section d'aborder successivement les coûts surfaciques, puis volumiques et enfin massiques. Cette approche permet d'apprécier les fluctuations du coût des matériaux en fonction du contexte (type d'ouvrage et type d'intervention) et également de comparer le coût des différentes techniques entre elles.

10.3.1 Coûts surfaciques (maçonnerie, béton, gabions)

Des coûts surfaciques ont été calculés sur des interventions concernant des ouvrages présentant des surfaces maçonnées, des parements en béton armé ou des gabions. Seuls sont concernés les digues et les murs et ouvrages de soutènement.

Coûts surfaciques (€/m²)				
	Digues		Murs et ouvrages de soutènement	
Matériaux	Techniques utilisées (type d'intervention)	Coûts observés (et dimensions)	Techniques utilisées (type d'intervention)	Coûts observés (et dimensions)
Maçonnerie	Maçonnerie et injection de béton (construction)	160<200<230 (maçonnerie)	Parement maçonné (reconstruction)	290 (maçonnerie)
		N=2		N=1
			Muret en maçonnerie (réparation)	100 (maçonnerie)
				N=1
Béton	Béton sur parement maçonné (réparation)	110 (parement béton)	Muret en béton avec fondations superficielles (construction)	160<210<270
		N=1		N=3
	Béton sur enrochements - colmatage de brèches (réparation)	740 (parement béton)		
		N=1		
Gabions	Pose de gabions (réparation)	140<150<160 (parement gabion)	Reconstitution de gabions disloqués (réparation)	765 (parement de gabions)
		N=2		N=1

Maçonnerie

Le coût de construction de la maçonnerie sur un mur ou un ouvrage de soutènement apparaît logiquement plus élevé que sur une digue. La maçonnerie a en effet dans le premier cas

un rôle essentiel dans la stabilité de la structure, tandis que sur une digue, seule la fonction de parement est en général recherchée. Le coût de la réparation apparaît être de l'ordre de deux ou trois fois inférieur à celui de la construction. Pour plus de précisions sur les coûts associés à ce matériau, le lecteur est invité à se reporter à l'étude spécifique réalisée sur les maçonneries dans le volet fluvial [Cerema, 2014].

Béton

En construction, les coûts surfaciques du béton n'apparaissent que sur les murs et ouvrages de soutènement avec des valeurs proches de celles de la maçonnerie. En réparation, les variations d'épaisseur d'utilisation sur les digues produisent un écart de coût très important entre le cas d'application sur un parement maçonné et le cas d'application en liaisonnement d'enrochements.

Gabions

L'utilisation de gabions dans le cadre d'opérations de réparation de digues et d'un muret a des coûts très sensiblement différents. Nous avons déjà eu l'occasion en section 9.2.3 d'indiquer que le coût de reconstitution de gabions disloqués paraissait très élevé.

Comparaison du coût des techniques

Les coûts surfaciques des gabions sont légèrement inférieurs à ceux de la maçonnerie. L'épaisseur très variable des ouvrages en béton ne permet pas vraiment de comparaison. Il est préférable, pour des composants dont les épaisseurs peuvent être très variables, de s'appuyer sur les coûts volumiques pour produire des estimations.

10.3.2 Coûts volumiques (terre, béton, bois)

Les coûts volumiques ont été observés sur tous les types d'ouvrages hormis les butées.

Coûts volumiques (€/m³)						
	Digues		Perrés ET Murs et ouvrages de soutènement		Epis ET Brise-lames	
	Techniques utilisées (type d'intervention)	Coûts observés (et dimensions)	Techniques utilisées (type d'ouvrage, type d'intervention)	Coûts observés (et dimensions)	Techniques utilisées (type d'ouvrage, type d'intervention)	Coûts observés (et dimensions)
Terre	Terrassement et enrochements (reconstruction – intervention d'urgence)	19<32<45 (terrassement)			Terrassement et enrochements (épi, réparation)	10<14<19 (terrassement)
		N=2				N=2
	Terrassement et enrochements (confortement)	6 (terrassement)				
		N=1				
	Terrassement et enrochements – Travaux « en continu » (réparation)	14<24<31 (terrassement)				
		N=3				
	Terrassement et enrochements – Travaux ponctuels (réparation)	12<30<46 (terrassement)				
		N=7				
	Terrassement – Travaux ponctuels (confortement)	23<25<28 (terrassement)				
		N=2				
Béton	Maçonnerie et injection de béton (reconstruction)	580 (injection de béton et ancrage)	Béton (perré, construction)	390 (béton armé)	Béton armé (épi, réparation)	360<580<790 (béton armé)
		N=1		N=1		N=2
	Béton sur parement maçonné (réparation)	310 (béton)	Réfection de joints de liaison et injection de fissures (perré, réparation)	390 (béton injecté)	Enrochements et béton (brise-lames, réparations ponctuelles)	220 (béton)
		N=1		N=1		N=1
	Béton sur enrochements - colmatage de brèches (réparation)	450 (béton)	Mur en béton avec fondations de profondeur 1 m (mur et ouvrage de soutènement, construction)	320<340<360 (béton)		
		N=1		N=2		
			Confortement falaise par structure en béton (mur et ouvrage de soutènement, confortement)	800 (béton injecté et ancré)		
				N=1		
Bois					Construction de poteaux et planches formant un écran (épi, construction)	1700 (bois)
						N=1
					Construction formée de pieux de diamètre 0,30 m et espacés de 0,6 m (épi, construction)	660 (bois)
						N=1

Terre (terrassément)

À l'exception du coût volumique de 6 €/m³ qui correspond à la réutilisation de matériaux du site ou à l'emploi de matériaux prélevés dans une zone d'emprunt proche, les autres coûts, compris entre 12 et 46 €/m³ correspondent à des matériaux d'apport, utilisés en faibles quantités au travers d'opérations de réparation (ou de reconstruction d'urgence). Pour plus de précisions sur le coût des terrassements, le lecteur est invité à se reporter à l'étude spécifique réalisée dans le volet fluvial [Cerema, 2014].

Béton

Le béton est un matériau dont le mode de mise en œuvre est très variable. En synthèse, nous pouvons retenir les ordres de grandeur suivants :

- béton non armé (ou faiblement armé) : de 220 à 310 €/m³ selon les conditions de mise en œuvre. La nécessité d'un coffrage ou de faibles quantités tendront à augmenter le coût ;
- béton armé :
 - dans des conditions simples de mise en œuvre, notamment en construction : entre 320 et 360 €/m³ ;
 - dans des conditions contraintes de mise en œuvre, notamment en réparation : entre 360 et 790 €/m³ ;
- béton injecté : une valeur de 390 €/m³ est relevée pour un béton injecté sans ancrage. Deux autres valeurs très supérieures sont relevées pour des opérations intégrant la pose d'ancrage : 580 €/m³ sur une digue et 800 €/m³ en confortement de falaise (opération classée dans les interventions sur les « murs et ouvrages de soutènement »).

Bois

Les coûts volumiques ne sont relevés que sur des épis avec des valeurs sensiblement différentes selon le principe de construction comme évoqué en section 9.3.1.2.

10.3.3 Coûts massiques (enrochements)

Les coûts massiques ne concernent que les enrochements. Ces coûts ont été observés sur tous les types d'ouvrages, hormis les murs et ouvrages de soutènement.

La disponibilité de la ressource et les conditions d'acheminement induisent une certaine variabilité dans les coûts, de l'ordre de 10 €/t, sur le prix de fourniture qui fluctue couramment entre 12 et 22 €/t. Cependant, l'influence des conditions de réalisation (types d'ouvrages et types d'intervention) est perceptible dans les coûts observés :

- s'agissant des opérations de construction ou de confortement, les interventions sur les ouvrages en haut d'estran (digue et perrés), présentent des coûts massiques compris globalement entre 15 et 30 €/t, tandis que les interventions sur les ouvrages situés sur l'estran ou en bas d'estran (épis et brise-lames) présentent des coûts massiques compris globalement entre 25 et 40 €/t ;
- s'agissant des opérations de réparation (observées surtout sur les épis), le réemploi d'une grande partie des matériaux pour « reconstituer » l'ouvrage induit une baisse significative du coût massique à des valeurs comprises entre 10 et 20 €/t.

Coûts massiques des enrochements (€/t)							
Digues		Perrés		Epis		Brise-lames ET Butées	
Techniques utilisées (type d'intervention)	Coûts observés (et dimensions)	Techniques utilisées (type d'intervention)	Coûts observés (et dimensions)	Techniques utilisées (type d'intervention)	Coûts observés (et dimensions)	Techniques utilisées (type d'ouvrage, type d'intervention)	Coûts observés (et dimensions)
Terrassement et enrochements (construction)	17<21<24	Enrochements (construction)	14<21<31	Enrochements (construction)	26<31<37	Enrochements (brise-lames, construction)	25<30<42
	N=2		N=4		N=5		N=6
Enrochements et superstructure en béton (construction)	29<31<33	Enrochements (confortement)	13<34<58	Enrochements (réparation)	11<19<27	Enrochements (brise-lames, confortement)	34
	N=2		N=3		N=2		N=1
Terrassement et enrochements – reprise générale du profil (confortement)	39			Terrassement et enrochements (réparation)	16<16,5<17	Enrochements et béton (brise-lames, réparations ponctuelles)	49
	N=1				N=2		N=1
Terrassement et béton (confortement)	29					Enrochements (butée en bas de plage, construction)	58
	N=1						N=1
Enrochements et mur en béton (confortement)	29<30<31						
	N=2						
Terrassement et enrochements – Travaux « en continu » (entretien)	13<21<26						
	N=3						
Terrassement et enrochements – Travaux ponctuels (entretien)	14<19<24						
	N=8						

11. Références

- *Shore Protection Manual*. Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, Mississippi, United States Army Corps of Engineers. 1984.
- *Responding to Changes in Sea Level: Engineering Implications*. Washington, D.C.: National Academies Press, National Research Council, 1987
- Durand Paul, « Érosion et protection du littoral de Valras-Plage (Languedoc, France). Un exemple de déstabilisation anthropique d'un système sableux », 2001. In: *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, janvier-mars, vol. 7, n° 1. pp. 55-68.
- *Plan littoral d'actions pour la gestion de l'érosion (Plage)*, Syndicat Mixte de la Côte d'Opale, 2003
- *The impacts of coastal armoring*, Shore and Beach 73(1): 13–22, Griggs G. B. 2005
- Marie-Claire Prat et Christine Clus-Auby, *Le rétablissement du transit sédimentaire par by-pass hydraulique*, Atelier de Cap-Breton, 6-7 avril 2006
- *De la défense contre la mer à la gestion durable du système côtier, journées d'études ANEL*, du 27 au 28 avril 2006 à Torreilles
- *Le contrôle souple des dunes littorales*, ONF, mission Littoral, septembre 2006
- Lambert Adrien, Rey Vincent, Provansal Mireille, Samat Olivier et Sabatier François, *Lutte contre l'érosion littorale : efficacité des méthodes de stabilisation par drainage de plage, le cas de la baie d'Agay*, Var, 2007
- Pupier-Dauchez S., *Le rechargement sédimentaire des plages vendéennes et charentaises : vers une gestion globale du littoral ?*, 2008
- *Analyse coûts-avantages de solutions d'adaptation à l'érosion côtière pour la Ville de Sept-Îles 5-7, Rapport final – version définitive*, Tecsalt 05-16627 – Mai 2008
- *Rechargement et qualité des plages de la Baie d'Aigues-Mortes : Prospective 2010-2015*, Journée d'information du 16 juin 2008 organisée à Carnon
- *Norme ISO 15686-5 – Calcul du coût global*, CGDD, 2009
- Heberger et al., *The impacts of sea-level rise on the California coast*, mai 2009
- *La gestion du trait de côte*, MEEDDM, 2010
- Vanroye Cyril (Dreal Languedoc Roussillon), Auffret Chloé (Cete Méditerranée), *Coût de la protection côtière en languedoc-Roussillon : Quelle rentabilité ?*, 2010
- Arquillière Jean-Louis, *Protection et aménagement durable du lido de Sète à Marseillan*, Thau Agglo, 2010
- *Évaluation des coûts de la protection des territoires littoraux en Languedoc Roussillon*, Cete Méditerranée, 2011
- *Rapport d'activité du Siba*, Syndicat intercommunal du Bassin d'Arcachon, 2012
- *Stratégie d'adaptation des ouvrages de protection marine ou des modes d'occupation du littoral vis-à-vis de la montée du niveau des mers et des océans*, Medde/GICC, août 2012
- *Opération de protection et de mise en valeur du lido de Frontignan*, étude d'impact, Artelia, janvier 2013

- *Littoral de Cap Atlantique, Programme d'actions de prévention des inondations, Synthèse*, Cap Atlantique, 2013
- *Programme d'actions de prévention des inondations complet de la baie de Bourgneuf*, BRL, août 2013
- *International Levee Handbook*, Ciria/Medde/Usace, 2013
- *Réhabilitation d'un cordon dunaire de second rang sur le massif de l'Espiguette*, BRL Ingénierie, Office National des Forêts, EID Méditerranée, 2013
- Goeldner-Gianella Lydie, Bertrand Frédéric, « *La SUBmersion marine et ses impacts environnementaux et sociaux dans le bassin d'Arcachon (France) : est-il possible, acceptable et avantageux de gérer ce risque par la dépoldérisation ?* », *Barcasub*, juillet 2013
- Heurtefeux Hugues, *Les méthodes « souples » d'adaptation et coûts associés*, Entente interdépartementale de démoustication, Paris, 6 septembre 2013
- *Diagnostic et élaboration d'orientations pour une gestion durable du trait de côte sur le littoral de la Côte d'Opale*, Egis et Université du littoral Côte d'Opale, mai 2014
- *Guide méthodologique Plan de prévention des risques littoraux*, DGPR/Cerema, 2014
- *Analyse multicritère des projets de prévention des inondations. Guide Méthodologique*, CGDD, 2014
- *Coût des protections contre les inondations fluviales*, Cerema, 2014
- *Mission d'intérêt général de stabilisation des dunes littorales du domaine forestier privé de l'État, rapport d'activité 2014*, Office national des forêts, 2014
- *Port de Bayonne : une drague à demeure en 2015, un projet structurant pour le territoire*, dossier de presse du 13 février 2014, CCI Bayonne Pays basque.
- Blaise Emmanuel et al., *Bilan des tempêtes de l'hiver 2013-2014 sur la dynamique de recul du trait de côte en Bretagne*, geomorphologie.revues.org, 2015
- *Bilan de l'activité de la CMI et des instances locales*, juillet 2011 à juillet 2015, Medde, février 2016
- *La défense des côtes et la prévention des risques littoraux sur l'île de Ré*, Communauté de communes de l'Île de Ré, 2016
- *Étude des systèmes de protection contre les submersions marines – Méthodologie et études de cas issues du retour d'expérience Xynthia*, Cerema, 2016

Sites Internet :

<http://www.ecoplage.fr/fr/>

<https://www.bdm.insee.fr/bdm2/index>

<http://www.12sur12.org/?cat=24&paged=6>

Références réglementaires

Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques.

ANNEXE A

DONNÉES ENREGISTRÉES ET DONNÉES ISSUES DES CALCULS

Cette annexe expose la manière dont les données sont traitées dans les tableaux propres à chaque type d'intervention. Ces explications viennent en complément de celles données en partie 3.

Un tableau d'analyse est consacré à chaque type d'intervention. Dans ce type de tableau, chaque ligne est consacrée à une opération.

Les tableaux comprennent entre 15 et 30 entrées qui donnent leurs noms aux colonnes. Les colonnes sont remplies de gauche à droite suivant qu'elles intéressent :

- l'identification et les caractéristiques principales de l'opération ;
- les prix et leur actualisation, les prix unitaires ;
- l'analyse (observations et calculs de pourcentages destinés à apprécier les fractions de coût que représentent les différentes techniques).

Voici en exemple les entrées de la base de données pour une intervention de construction d'un perré en enrochements.

L'identification et les caractéristiques principales de l'opération

Id	"Lieu & Département"	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume terrassement (m³)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût terrassement HT (€)	Coût enrochements HT (€)
MA17670	La Couarde sur mer (17) - entre la Molinatte et le Goisil	CD17	rechargement en tout-venant et constitution de rampes	Détail estimatif final	100	2	2800	450	187115	119000	10315

L'identifiant (Id) est composé de deux lettres et de cinq chiffres avec éventuellement un chiffre supplémentaire entre parenthèses. Les cinq chiffres correspondent au code postal de la commune où se sont déroulés les travaux. Lorsque plusieurs opérations portant sur le même type d'ouvrage apparaissent dans une commune, un chiffre est ajouté entre parenthèses pour les distinguer (certaines opérations qui ont permis de compléter les analyses n'ont pas reçu d'identifiant).

Les colonnes **Lieux et départements et Maître d'ouvrage** n'appellent pas de commentaires particuliers.

La colonne **Travaux** indique l'intitulé de l'opération.

La colonne **Source** précise le type de document d'où ont été extraits les coûts : par ordre de préférence, le décompte général définitif (DGD), le détail estimatif (DE) de l'offre retenue, parfois mentionné comme « marché ». Lorsqu'un avenant a été passé, le détail estimatif en résultant a été préféré au détail estimatif initialement inclus dans le marché. Les tableaux de suivi financier des programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI) ont également été exploités lorsque le montant total des marchés de travaux y figurait, c'est-à-dire pour les actions terminées.

Les colonnes suivantes présentent les **dimensions ou quantités caractéristiques de l'intervention**. Leur nombre et leur intitulé varient en fonction des opérations mais les deux

premières colonnes indiquent toujours la longueur sur laquelle s'effectue l'opération et la hauteur de l'ouvrage considéré. Viennent ensuite des quantités (volumes, masse, surface) dépendant des matériaux utilisés, puis le montant total HT du marché et les montants associés aux principales techniques utilisées.

Le calcul des prix unitaires

Les coûts associés aux différentes techniques sont actualisés puis les coûts unitaires sont obtenus par division des coûts actualisés par la quantité correspondante.

Tous ces prix sont exprimés en euros (valeur octobre 2014) et hors taxes.

Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût terrassement HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût volumique HT (€ octobre 14/m³)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)
2010 juin	656,4	700,5	199686	126995	11008	1997	45	24

Autres éléments destinés à la conduite de l'analyse

Observation	Blocométrie	% enrochements	% terrassement	% cumulé	Enrochements (t/ml)	Terrassement (m³/ml)
Apport de sable : 100 000€, terrassement et préparation 16700€, constitution des rampes et enrochements : 66900€.	100/300 et 300/1000kg	6%	64%	69%	5	28

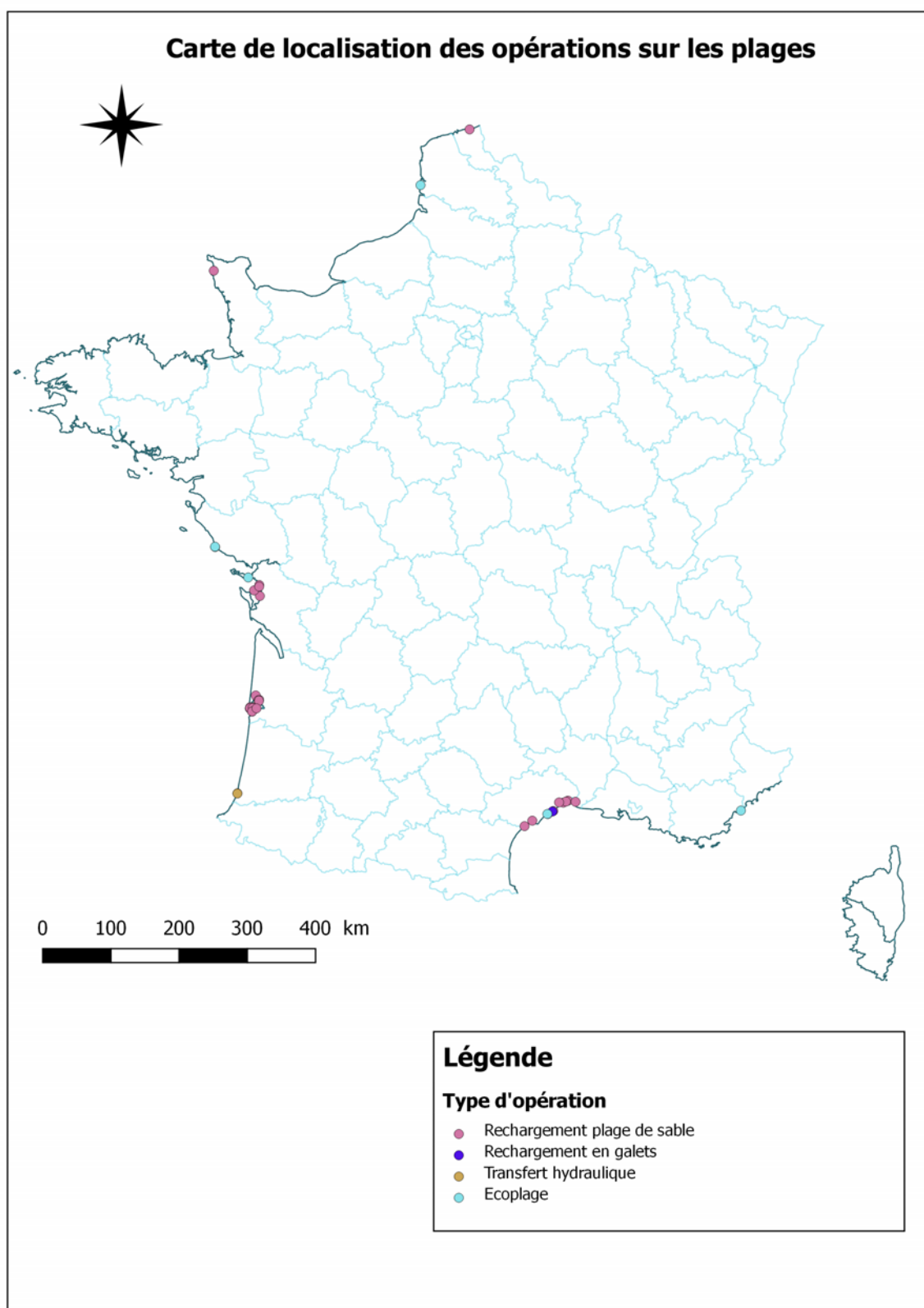
Lors de l'étude des dossiers d'opération, la colonne **Observations** permet de noter les éléments spécifiques influant sur les prix : ouvrages associés à l'ouvrage principal, opération fragmentée sur plusieurs sites, matériau particulier ou difficulté technique particulière...

D'autres informations, telles que la **blocométrie** et le **tonnage utilisé au mètre linéaire** sont mentionnées ou calculées le cas échéant.

Enfin les **pourcentages de coûts** correspondant à l'installation de chantier et aux différentes techniques sont indiqués, ainsi que le cumul de ces pourcentages, ce qui permet d'apprécier la façon dont les postes principaux couvrent le total du coût de l'opération.

ANNEXE B

TABLEAU DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX PLAGES



Source: tableaux en annexes

Réalisé par: Cerema Eau mer et Fleuves

Rechargement plages de sable par moyens terrestres

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	Volume (m³)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02 octobre 14	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€) octobre 14	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût volumique HT (€ octobre 14/m³)	Observation	Origine sable	Distance chantier- dragage	m3/ml
	Port-des-Barques (17)	Port-des-Barques	Rechargement	Ades journées ANEL 2006	n.c	25000	348733	2006 avril	700.5	549.3	446000	n.c	18	Apport par transport terrestre	Oléron	50 km	
MA33950	Lège-Cap Ferret (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	9000	98285	2006 mai	700.5	553.6	124365	n.c	14	transport terrestre et remodelage in-situ	Mimbeau-Claouey	23 km & 7 km	
MA33120	Atcahon (plage de Péreire) (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	7800	49960	2006 juin	700.5	554.8	63080	n.c	8	transport terrestre et remodelage in-situ	Péreire & jetée nord Mouleau	4,5 km	
MA33510	Andernos les bains (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	7000	158863	2007 juin	700.5	584.7	190326	n.c	27	moyen terrestre (transport par camion)	le Mimbeau	27 km	
MA33950 (2)	Lège-Cap Ferret (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	11500	142140	2007 juin	700.5	584.7	170281	n.c	15	moyen terrestre (transport par camion)	le Mimbeau, Bélisaire & Pequey	22 km	
MA33510 (2)	Andernos les bains (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	3500	56856	2008 juin	700.5	629.5	63269	n.c	18	moyen terrestre (transport par camion)	le Mimbeau	27 km	
MA33950 (3)	Lège-Cap Ferret (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	16000	91973	2008 juin	700.5	629.5	102347	n.c	6	transport terrestre et remodelage in-situ	le Mimbeau	23 km	
MA33950 (4)	Lège-Cap Ferret (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	9236	61037	2009 mai	700.5	623.1	68619	n.c	7	7636m3 pris sur place et 1600 m3 déplacés par camion.	Bélisaire	n.c	
MA33950 (6)	Lège-Cap Ferret (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité 2012	n.c	18150	115385	2012 juin.	700.5	698.8	115665	n.c	6	13550 m3 déplacés in situ et 4600 m3 transportés par camion. régalage de matériaux prélevés en bas de plage.	Bélisaire, Mimbeau, Pastourelles	n.c	
MA33260 (2)	la Teste de Buch (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité 2012	220	2500	10452	2012 janvier.	700.5	693.6	10555	48	4	remodelage in-situ		40m	11,36
	Siouville (50)	CC des Fleux	Rechargement ponctuel	marché	100	5400	12020	2015 nov	700.5	701.7	11999	120	2			300m	54
												CAMoy/ml	CAMoy/m3				
												84 €	11 €				
												CAMini/ml	CAMini/m3				
												48 €	2 €				
												CAMaxi/ml	CAMaxi/m3				
												120 €	27 €				

Rechargement plages de sable par drague stationnaire

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	Volume (m³)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût volumique HT (€ octobre 14/m³)	Observation	Origine sable	Distance chantier-dragage	m3/ml
MA331 20 (3)	Arcachon (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	8800	142140	2007 juin	584,7	700,5	170291	n.c	19	Drague stationnaire	jetée du Mouleau	7,7 km	
MA331 20 (4)	Arcachon (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	6000	96990	2008 juin	629,5	700,5	107929	n.c	18	Drague stationnaire	jetée Mouleau	5 km	
MA331 20 (5)	Arcachon (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	9000	95318	2009 juin	625,6	700,5	106730	n.c	12	Utilisation DAS. Sur 9000m3, 5000 m3 régaliés	banc de Péreire & jetée Mouleau	n.c	
MA335 10 (3)	Andernos les bains (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	7400	5769	2009 juin	625,6	700,5	6460	n.c	1	Objectif dragage chenal d'Andernos	chenal andernos	n.c	
MA339 50 (5)	Lège-Cap Ferret (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité 2012	300	5500	62709	2012 déc	703,3	700,5	62459	208	11	Drague stationnaire	Banc de la Vigne	0,2 km	18,33
MA331 20 (6)	Arcachon(33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité 2012	1000	28300	154682	2013 juin.	698,8	700,5	155059	155	5	test d'une nouvelle drague aspiratrice stationnaire	Banc faisant face à la plage.	0,2	28,3
	Valras-Vendres (34)	SIVOM	Rechargement	Marché, d'après Etude Cete Méditerranée	780	80000	1093636	2006 oct	585,5	700,5	1354716	1737	17	Drague stationnaire + 3,5 km de conduite	Accumulation sous-marine à l'est de la digue de l'Orb	3,5 km	102,56
	Villeneuve les Maguelone	CG34 / Commune de VLM	rechargement de plage	DGD	625	42000	340824	2014	701,7	700,5	340241	544	8	DAS avec canalisation de 2200m – Répartition des installations de chantier au prorata du montant des travaux			67,2
														CAMoy/ml	CAMoy/m3		
														661 €	11 €		
														CAMini/ml	CAMini/m3		
														155 €	1 €		
														CAMaxi/ml	CAMaxi/m3		
														1 737 €	19 €		

Rechargement plages de sable par drague aspiratrice en marche

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	Volume (m³)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût volumique HT (€ octobre 14/m³)	Observation	Origine sable	Distance chantier-dragage	m³/ml
MA17123	Ile d'aux (17)	CD17	rechargement (en urgence)	Détail estimatif final	200	5500	50050	2010 juin	656,4	700,5	53413	267	10				27,5
MA33115 (3)	Pyla-sur-mer (33)	Pyla-sur-mer	Rechargement	Fiche technique	1500	1000000	1839465	2003 juin	484,3	700,5	2660634	1774	3		Jetée du Moulleau et banc de Bernet	4 km	666,67
	Châtelaillon (17)	Ville de Châtelaillon	Rechargement	guide gestion du trait de côte	1800	500000	5000000	1989 à 2004	520,1	700,5	6734282	3741	13	Volume rechargé en plusieurs opérations	Fonds marins proches		277,78
MA33260	la Teste de Buch (33)	SIBA	Rechargement	Rapport activité	n.c	160000	371237	2007 fév	573,6	700,5	453368	n.c	3		banc de Bernet	entre Cap Ferret et Pyla	
MA33120 (2)	Arcachon (33)	SIBA	Rechargement	Idem	n.c	18200	40134	2007 mars	576	700,5	48809	n.c	3		banc du Bancot		
MA33115 (2)	Pyla-sur-mer (33)	SIBA	Rechargement	Idem	1800	106800	209030	2009 fév	622,1	700,5	235373	131	2		banc de Bernet (flanc est)	entre Cap Ferret et Pyla	59,33
MA33115 (4)	Pyla-sur-mer (33)	SIBA	Rechargement	Idem	3300	150000	270903	2012 mars	696,7	700,5	272381	83	2		Face à la zone de dépôt	0,3 km	45,45
	Palavas les flots (34)	SIVOM	Rechargement	DGD (d'après Etude Cete Méditerranée)	3050	355279	2355339	2008 oct	624,7	700,5	2641132	866	7		flèche sous-marine de l'Espiguette	14 km	116,48
	Petit travers (34)	SIVOM	Rechargement	Idem	3300	382138	2533399	2008 oct	624,7	700,5	2840797	861	7		Idem	11 km	115,8
	Carnon (34)	SIVOM	Rechargement	Idem	1800	187903	1245712	2008 oct	624,7	700,5	1396865	776	7		Idem	11 km	104,39
	Boucanet-Grau du roi (34)	SIVOM	Rechargement	Idem	2000	170200	1128349	2008 oct	624,7	700,5	1265261	633	7		Idem	4 km	85,1
	Lido de Sète (34)	Thau Agglo	Rechargement	marché	2 200	350000	3594350	2014/2015	701,7	700,5	3588203	1631	10		Idem	40 km	159,09
	Lido de Frontignan (34)	Thau Agglo	Rechargement	marché	1 280	219500	2653295	2015	701,7	700,5	2648758	2069	12		Idem		171,48
	Vias (34)	CC Hérault Méditerranée	Rechargement	DGD	860	60000	1365030	2015	701,7	700,5	1362696	1585	23	Soin particulier apporté au profil de la plage et à la maîtrise de la turbidité.	Sable acheminé de Valras par voie maritime.	environ 10km	69,77
	Dunkerque (59)	GPMD	Rechargement	http://www.seable.com	400	900000	3650000	2015	701,7	700,5	3643758	9109	4				2250
	Châtelaillon (17)	Ville de Châtelaillon	Rechargement	Etat d'avancement PAPI 03/08/15	200	80000	1301214	2014 déc	695,9	700,5	1309815	6549	16	Accompagnement construction d'un brise-lames.	Longe nord de Boyard à 12 km		400
												CAMoy/ml	CAMoy/m3				
												2 148 €	8 €				
												CAMini/ml	CAMini/m3				
												83 €	2 €				
												CAMaxi/ml	CAMaxi/m3				
												9 109 €	23 €				

Rechargement en galets

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	Volume (m³)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€) octobre 14)	Coût linéaire HT (€) octobre 14/m)	Coût volumique HT (€) octobre 14/m³)	Observation
	Lido de Frontignan (34)	Thau Agglo	Création	DGD	740	29 000	1598644	2015	701,7	700,5	1595909,7	2157	55	intègre terrassement et accès. Quantité supplémentaire dans le cordon : 10 900 m³.

Transfert hydraulique

Investissement

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€) octobre 14)	Coût linéaire HT (€) octobre 14/m)	Observation
MA40130	CapBreton(40)	Capbreton	Transfert hydraulique (conduite, bâtiment et matériel TP)	Marché	1300	3515222	2007 août	585,5	700,5	4205658	3235	Débit de sable inscrit au marché : 340T/h (180 m3/h). Débit observé : 250 m3/h.

Exploitation

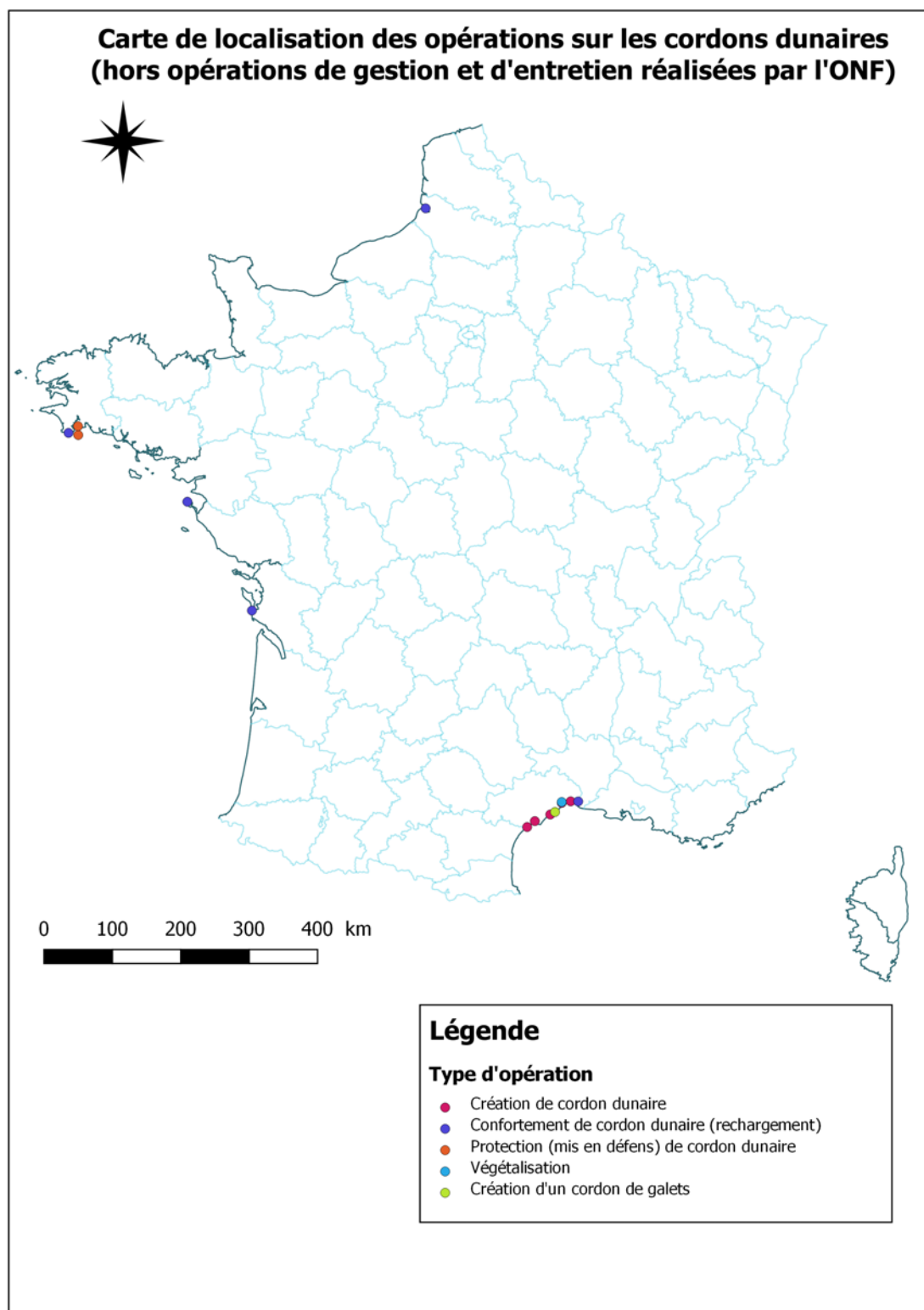
Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	Volume sable (m³)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€) octobre 14)	Coût volumique HT (€) octobre 14/m³)
MA40130	CapBreton(40)	Capbreton	Transfert hydraulique et régalaie	Capbreton magazine municipal n°129	100000	280000	2012 avril	698,5	700,5	280801,7	2,81

Ecoplage

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	Linéaire de drains (m)	Coût d'installation HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Frais annuels de fonctionnement	Réactualisation frais de fonctionnement	coût de fonctionnement au ml de plage	Observation
	Sables d'Olonne	Ville des Sables d'Olonne	Ecoplage	sites Internet	700	700 m (haut de plage) et 600 m (milieu de plage)	726000	2002	474	700.5	1072918	1533	16600/an (valeur avril 2008)	18982	27,12	Électricité : 17152€ et gestion poste de relèvement 1830€.
	Sables d'Olonne	Ville des Sables d'Olonne	Ecoplage	fiche de synthèse DREAL	400	400	316300	2002	474	700.5	467443	1169				Addition de 400 m supplémentaires de drains
	Agay	Saint Raphaël	Ecoplage	Adrien Lambert et al, 2007]	600	600	710200	2004 février.	499.7	700.5	995588	1659	10000	14018	23,36	
	Lido de Sète/Listel (34)	Thau Agglo	Ecoplage	DGD	700	1 885	1253916	2011 et 2012	698.8	700.5	1256966	1796	12900	12931	18,47	Conception 92 000€. Station de pompage de 480m3/h
	Merlimont (62)	Merlimont	Ecoplage	http://merlimontinfopale.unblo.fr	900	900	1330000	en cours	701.7	700.5	1327726	1475	n.c.	n.c.	n.c.	200 000€ de frais d'étude
	Rivedoux (17)	Communauté de communes de l'île de Ré	Ecoplage	Presse	900	900	1500000	en cours	701.7	700.5	1497435	1664	n.c.	n.c.	n.c.	175000€ de frais d'étude
																CAMoy/ml
																23 €
																CAMini/ml
																18 €
																CAMaxi/ml
																27 €

ANNEXE C

TABLEAU DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX CORDONS DUNAIRES



Source: tableaux en annexes

Réalisé par : Cerema Eau mer et fleuves

Création de cordons dunaires

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume sable (m³)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût volumique HT (€ octobre 14/m³)	Observation	Sable (m³/ml)
	Valras (34)	SIVOM	création cordon dunaire derrière brise-lames	Marché (d'après étude Cete Méditerranée)	450	1	8000	263776	2006 oct	565,5	700,5	326746	726	41	Amené du sable par drague stationnaire et 3,5 km de conduite	18
	Petit travers (34)	SIVOM	création	DGD (d'après étude Cete Méditerranée)	600	n.c	17455	306684	2008 oct	624,7	700,5	343896	573	20	Amené du sable par DAM dans le cadre d'une vaste opération de rechargement de plage.	29
	Lido de Sète (34)	Thau Agglo	création	DGD	10 000	1,6	130 000	2506700	2008	624,7	700,5	2810859	281	22	cordon de hauteur 1,6 m construit sur l'ancienne route dont les fondations sont constituées de sable. Apport de 89 000 m³ sur 130 000 m³ nécessaires.	13
	Vias (34)		création	Marché	860		15 700	399778	2015	701,7	700,5	399094	464	25	Végétalisation, équipement en cheminement piétons et véhicules, pose de ganivelles et entretien pendant 2 ans.	18
	Villeneuve-lès-Maguelone	CG34	création et réhabilitation	Marché	625		36700	521688	2014	701,7	700,5	520796	833	14	Utilisation de matériaux sablo-limoneux. Végétalisation (73000€), accès piétons et pose de ganivelles : 1800 m à 9,5€/ml (perméabilité 75 %) et 1100 m à 10,5€/ml (perméabilité 60%)	59
													CAMoy/ml	CAMoy/m3		
													576 €	24 €		
													CAMini/ml	CAMini/m3		
													280 €	14 €		
													CAMaxi/ml	CAMaxi/m3		
													835 €	41 €		

Confortement de cordons dunaires (rechargement)

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume sable (m³)	Coût HT (€)	Coût HT sable (€)	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût HT sable (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14m)	Coût volumique HT (€ octobre 14m³)	Observation	Origine sable	Distance chantier-dragage	m³/ml
MA17390	La Tremblade (17)	CD17	réfection d'urgence	Détail estimatif	300	n.c	2880	20000	n.c	2010 juin	700.5	21344	n.c	71	7	Remobilisation de matériaux et évacuation de matériaux en déblai. Pas de pose de ganivelles.			10
MA29270	Plobannalec-Lescornil et Locudy (29)	Plobannalec-Lescornil et Locudy	confortement du cordon dunaire des sables blancs	Marché	280	7	9700	66285	n.c	2004 juin.	700.5	89276	n.c	319	9	Rechargement et mis en défens.	flèche dunaire proche	1km	35
	Noirmoutier-en-Ile (85)	CDC Ile de Noirmoutier	Rechargement dune	Fiche synthèse	400		8600	84000	n.c	2002 juin	700.5	126325	n.c	316	15	Pose de grillage	n.c	n.c	22
	Le Crotoy (80)	Syndicat Mixte Baie de Somme - Grand Littoral Picard	Réhabilitation	http://www.grands	830	n.c	n.c	200000	n.c	2012	700.5	200487	n.c	242		Apport de sable dans les brèches et sur l'avant du massif dunaire (sur 500m), pose de ganivelles, plantation d'Oyats (330m) et la mise en place de fascinage (500m)			
	Le Grau-du-Roi (30)	Le Grau-du-Roi	Réhabilitation cordon dunaire en retrait	Détail estimatif	900		3575	98978	51838	2014 avril	700.5	98808	51749	110	14	Création et surélévation de dune, paillage en roseaux et semis			4
														CAMoy/ml	CAMoy/m3				
														211 €	11 €				
														CAMini/ml	CAMini/m3				
														70 €	7 €				
														CAMaxi/ml	CAMaxi/m3				
														320 €	15 €				

Protection (mis en défens) de cordons dunaires

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Observation	Coût linéaire clôture 3 fils HT (€ octobre 2014/m)	Coût ganivelle hauteur 1,2m et perméabilité 50 % HT (€ octobre 2014/m)	Coût ganivelle hauteur 1,2m et perméabilité 80 % HT (€ octobre 2014/m)
MA29270	Plobannaec-lesconil et Locudy (29)	Plobannaec-lesconil et Locudy	mise en défens du cordon dunaire des sables blancs	Marché	1100	7	37667	2004 juin.	520,1	700,5	50732	46	Ganivelles sur deux rangées (2'1100m à 12 et 14,5€/ml car perméabilité différente) et clôtures 3 fils sur le pourtour (4,5€/ml).	6	20	16

chiffre cohérent avec les valeurs de EID

22€/ml si ouvrages techniques

14€/ml si effet de barrière seul recherché.

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Observation
MA29880	Combrit Ile Tudy (29)	Syndicat mixte B.L.N.L.	Confortement du cordon dunaire au Treustel par tissu Tri-X ou équivalent	Marché	700	2	71331	2002 oct	473	700,5	105639	151	Tissu sur deux rangées de 700m. de hauteurs respectives 1 et 2 m.

Végétalisation

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	l(m)	S(m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût surfacique HT (€/m²)	Observations
	Villeneuve les Maguelone	CG34 / Commune de VLM	végétalisation	DPGA	625	20	12500	73060	2014	701,7	700,5	72935,06	116,7	5,8	Dont 60060€ de végétalisation. Stockage du sable avec graine (5000€) - euphorbia pepis et limonium girardium

Création d'un cordon de galets

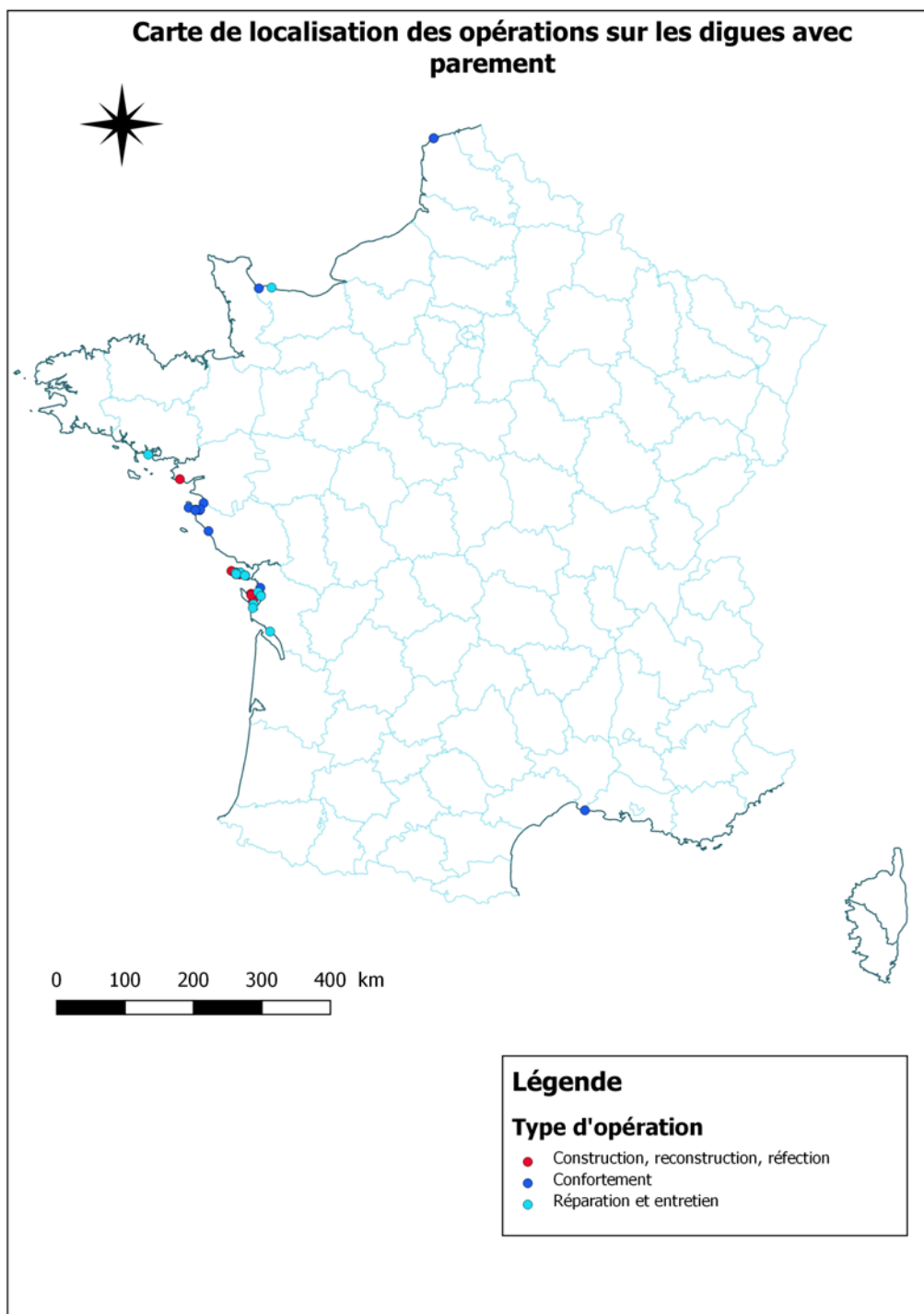
Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	Volume galet (m³)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût volumique HT (€ octobre 14/m³)	Observation
	Lido de Frontignan (34)	Thau Agglo	Création	DGD	740	10 900	600 869	2015	701,7	700,5	599842	811	55	Intègre terrassement et accès. Quantité supplémentaire dans le sous-sol : 29000 m³.

ANNEXE D

TABLEAUX DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX DIGUES

Dans cette annexe nous présenterons successivement :

- les données relatives aux digues avec parement
- les données relatives aux digues sans parement.



Source : tableaux en annexes

Réalisé par : Cerema Eau mer et fleuves

Construction, reconstruction, réfection

Terrassement et enrochements

Id	Lieu & Département	Maître d'ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume terrassement (m³)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût terrassement HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€) octobre 14	Coût terrassement HT (€) octobre 14	Coût enrochements HT (€) octobre 14	Coût linéaire HT (€) octobre 14 (m)	Coût volumique HT (€) octobre 14 (m³)	Coût massique enrochements HT (€) octobre 14 (t)	Observation	% enrochements	% terrassement	% cumulé	Enrochements t/ml	Terrassement m³/ml
MA17670	La Courde sur mer (17) - entre la Molinette et le Gouil	CD17	rechargement en tout-venant et constitution de rampes	Détail estimatif final	100	2	2800	450	187115	119000	10315	2010 juin	656,4	700,5	199686	126995	11008	1997	45	24	Apport de sable : 100 000€, terrassement et préparation 16700€, constitution des rampes et enrochements : 66900€, Blocométrie : 100/300 et 300/1000kg	6%	64%	69%	5	28
	Saint Georges d'Oleron (17)	CD17	réfection d'urgence – reprise terrassement et enrochements – ré-ensablement	Fiche synthèse (coût final)	80	3	3763	7400	213835	67500	121000	2010 juin	656,4	700,5	228201	72035	129129	3126	19	17	Apport de la moitié des enrochements et réutilisation de l'autre moitié. Blocométrie : 300/1000kg	57%	32%	88%	93	47
																					CAMoy/t					
																					CAMoy/m³	2 561 €	32 €	21 €		
																					CAMini/t					
																					CAMini/m³					
																					CAMaxi/m	1 997 €	19 €	17 €		
																					CAMaxi/t					
																					CAMaxi/m³	3 126 €	45 €	24 €		

Maçonnerie et injection de béton

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume béton (m³)	Surface maçonnerie (m²)	Coût HT (€)	Coût béton HT (€)	Coût maçonnerie HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 14	Coût HT (€)	Coût béton HT (€)	Coût maçonnerie HT (€)	Coût linéaire HT (€)	Coût volumique HT (€)	Coût surfacique HT (€)	Observation	% coût maçonnerie	% coût béton
MP174 80-2	Château d'Oléron (17) – Pointe des Doux	CD17	Réfection d'urgence – reconstruction des perrés en maçonnerie et remaniement d'encrochements	Fiche synthèse (coût final)	80	3,5	220	490	238355	119680	74400	2010 juin	656,4	700,5	254369	127721	79399	3180	581	162	60000 € de béton de propriété et coffré, 80 000 € d'injection de béton à la pompe +40 000 € d'acier d'ancrage, 68 000 € de fourniture et mise en œuvre de moellons, 6 000 € de rejointoiement.	0,31	0,5
MP171 90-A	Saint Georges d'Oléron (17) – La Perrotine	CD17	Réfection de maçonnerie sur 100 m et réfection de talus en encrochements sur 50 m	Fiche synthèse (coût final)	150	2 à 3 m	n.c.	684	194594	n.c.	146813	2010 juin	656,4	700,5	207668	n.c.	156677	1384	n.c.	229	Les maçonneries calcaires et les rejointoiements manuels représentent l'essentiel des dépenses.	0,75	n.c.
												CAMoy/ml	CAMoy/ m³	CAMoy/ m²									
												2 282 €	581 €	196 €									
												CAMini/ml	CAMini/ m³	CAMini/ m²									
												1 384 €	581 €	162 €									
												CAMaxi/ml	CAMaxi/ m³	CAMaxi/ m²									
												3 180 €	581 €	229 €									

CAMoy/ml	CAMoy/m³	CAMoy/m²
2 282 €	581 €	196 €
CAMini/ml	CAMini/m³	CAMini/m²
1 384 €	581 €	162 €
CAMaxi/ml	CAMaxi/m³	CAMaxi/m²
3 180 €	581 €	229 €

Construction, reconstruction, réfection

Enrochements et superstructure en béton

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coûts enrochements HT (€)	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût octobre 14	Coût enrochements (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût massique enrochements (€ octobre 2014/t)	Observation	Enrochements t/ml
	Sangatte (62)	DDTM 62	Renforcement par une carapace en enrochements surmontée d'une plateforme et d'un parapet béton	Marché de travaux	2400	8m dont 2 m de butée de pied	349200	14365960	9937135	2016 nov	699,2	14392670,17	9955610,8	5997	29	Installation de chantier : 710510€. Atelier béton : 2565450€. Deux couches 0,2-0,4T + Deux couches 2-4T	145,5
	Saint-Clément-des-Baleines(17)	CD17	Reconstruction	CD17	1600	8m dont 1 m de butée de pied	86000	8500000	2859074	2016 nov	699,2	8900000	2864389,8	5563	33	Forte exposition hydrodynamique - Site classé - aménagement s paysagers (terrassement s et plantations pour bois et dunes fixes et mobiles) : 542000€HT	53,75
														CAMoy/ml	CAMoy/T		
														5 780 €	31 €		
														CAMini/ml	CAMini/t		
														5 563 €	29 €		
														CAMaxi/ml	CAMaxi/t		
														5 997 €	33 €		

Terrassement et gabions

	Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Linéaire gabions (m²)	Coût HT (€)	Coût terrassement HT (€)	Coût gabions (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût terrassement HT (€ octobre 14)	Coût gabions HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût linéaire terrassement HT (€ octobre 14/ml)	Coût linéaire gabions HT (€ octobre 14/ml)	Observation
	Atlantia	44	Cap Atlantique	Construction digue avec soutènement gabion et matelas gabion	DQE	560	2	400	830940	437315	182950	2015 mars	696.6	700.5	835592	439763	183974	1492	785	460	Les gabions ne sont posés que sur 400m. Leur coût est équivalent au coût des terrassement s.

Génie civil : coque béton sur remblais avec refends en palplanches

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14/ml)	Observation	
	Le Boulillon (17)	CD17	Reconstruction	Avenant n°2 au DE	720	8m hors fondation de palplanches	10276350	2015 mars	696.6	700.5	10276350	14273	Forte exposition hydrodynamique. En revêtement du béton armé : côté mer parement maçonné, côté terre matelas végétal.

Confortement

Terrassement et enrochements – reprise générale du profil

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indices TP02	Coût HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)	Observation	% enrochements	Enrochements t/ml
Loix Est - Petite et Grande Tonille, Culi d'Âne	Île de Ré, Loix (17)	CD17	Réhabilitation des digues littorales	Suivi d'avancement PAPI	2240	4,5 à 5 m	n.c.	3225000	n.c.	2014 janv	707,3	3193954,77	n.c.	1426	n.c.	Zone faiblement exposée aux sollicitations hydrodynamiques. Carapace d'enrochements en granit clair + parapet en béton armé.	n.c.	n.c.
PAPI action 7-6 Port du Bec au passage du Gois	Beauvoir (85)	Syndicat mixte Baie de Bourgneuf	Rehausse et confortement par enrochements	PAPI (estimation de travaux en phase Projet)	1565	4 à 5	n.c.	1820000	n.c.	2017	699,2	1823384	n.c.	1165	n.c.	Ouvrage non exposé directement à la houle car abrité par des polders inexplorés. Ouvrage en bordure du canal de la Matle à Nauleau. Travaux prévoyant la pose d'une vanne sur le canal.	n.c.	n.c.
Saintes Maries de la Mer (Ouest) (13)		Symadrem	Reprofilage	DGD	900	3,5	16200	673227,1	559377	2009 juil	700,5	754191	626649	838	39	Sur la foi du MO, les coûts ont été calculés sur la base de -9% de l'estimation.	83%	18
														CAMoy/ml	CAMoy/t			
														1 143 €	39 €			
														CAMini/ml	CAMini/t			
														838 €	39 €			
														CAMaxi/ml	CAMaxi/t			
														1 426 €	39 €			

Terrassement et enrochements – rehausse

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume terrassement (m³)	Enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût HT terrassement HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Coût HT HT (€ octobre 14)	Coût terrassement HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût volumique terrassement HT (€ octobre 14/m³)	Coût massique enrochement HT (€ octobre 14/t)	Observation
MP14230	Géfosse Fontenay & Grandcamp-maisy (14)	ASA Géfosse-Grandcamp	Remise à niveau & renforcement	Marché	845	n.c	2077	3802	197118	12002	103463	2010 nov	208834	12715	109612	247	6	29	7 secteurs Une bonne partie du coût comprend la préparation du support, gedextile...
PAPI action 711 – digue sud du Gois (hors digue des Mattes)	Barbâtre (85)	Communauté de Communes Noirmoutier	Rehausse sans confortement des parties en place	Tableau de suivi financier du PAPI	2835	4 à 5			746650			2017	748038			264	n.c.	n.c.	Coût réel des travaux inférieur de 50 % aux estimations. Le PAPI chiffre à 2000€/an les opérations de surveillance et à 16000€/an les actions d'entretien.
PAPI action 773 – digue de Sébastopol (Opération dans le prolongement nord de la digue sud du Gois)	Barbâtre (85)	Communauté de Communes Noirmoutier	Rehausse de 0,5 m et confortement par enrochements	Tableau de suivi financier du PAPI	650	4 à 5			200880			2014 nov	201628			310	n.c.	n.c.	Des interruptions de chantier sont prévues pendant les périodes d'hivernage et de nidification des oiseaux. Replantation des arbres hors zone d'influence de la digue. Entretien prévu par des chèvres (éco-pâturage).
										CAMoy/ml	CAMoy/m³	CAMoy/T							
										274 €	6 €	29 €							
										CAMini/ml	CAMini/m³	CAMini/t							
										247 €	6 €	29 €							
										CAMaxi/ml	CAMaxi/m³	CAMaxi/t							
										310 €	6 €	29 €							

Confortement

Enrochements et mur en béton

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût enrochements (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02	Indice TP02	Coût (€) octobre 14	Coût enrochements (€) octobre 14	Coût béton (€) octobre 14	Coût linéaire HT (€) octobre 14 (ml)	Coût massique enrochements (€) octobre 2014(t)	Coût linéaire béton HT (€) octobre 14(ml)	Observation
PAPI action 714 – digue du Bouclard	La Guérinière (85)	Communauté de Communes Noirmoutier	Rehausse et confortement par enrochements	Tableau de suivi financier du PAPI	230	3	n.c.	204876	n.c.	2014 juin	701,8	700,5	700,5	204496	n.c.	n.c.	889	n.c.	n.c.	2 ouvrages hydrauliques dans le corps de digue. Entretien estimé à 1200€/an.
PAPI action 712 – digue du Gols	Barbâtre (85)	Communauté de Communes Noirmoutier	Renforcement et rehausse	Tableau de suivi financier du PAPI	605	4 à 5		800000	n.c.	2016	695,3	700,5	700,5	805983	n.c.	n.c.	1332	n.c.	n.c.	Digue en site classé. Carapace en pierres pavées. Construction d'un muret bétonné en crête de digue sur environ 200 ml. Entretien estimé à 3000€/an.
Les Boucholiers – digue du port des Boucholiers à la route de l'Oasis	Châtelailon (17)	Ville de Châtelailon	Confortement par enrochements et muret de couronnement en béton armé.	Etat d'avancement PAPI 03/08/15	1600	5 à 6	58000	4550000	1798000	2015 juin	697,9	700,5	700,5	4566951	1804698	2762252	2854	31	1726	
	Sangatte (62)	DDTM 62	Renforcement par une carapace en enrochements surmontée d'une plateforme et d'un parapet béton	Marché de travaux	2400	8m dont 1 m de butée de pied	349200	14365960	9937135	2016 nov	699,2	700,5	700,5	14392870	9955611	4437059	5997	29	1849	Hauteur 8 m dont 2 m de butée de pied. Installation de chantier : 710510€ - Atelier béton : 2565450€. Deux couches 0,2-0,4T + Deux couches 2-4T.
																	CAMoy/ml	CAMoy/m³	CAMoy/ml	
																	2 788 €	30 €	1 788 €	
																	CAMini/ml	CAMini/m³	CAMini/ml	
																	889 €	29 €	1 726 €	
																	CAMax/ml	CAMax/m³	CAMax/ml	
																	5 997 €	31 €	1 849 €	

Terrassement et béton

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Observation
PAPI action 7-3 Mise à l'eau de Coupelasse	Bouin (85)	Syndicat mixte Baie de Bourgneuf	Protection passage surélévé en haut de cale	PAPI (estimation de travaux en phase Projet)	20	3 à 5	40000	2017	699.2	700.5	40074	2004	Remblai couvert d'un dallage béton
PAPI action 7-5 Confortement digue du Dain	Bouin (85)	Syndicat mixte Baie de Bourgneuf	Confortement en béton sans rehausse	PAPI (estimation de travaux en phase Projet)	4065	3 à 5	6000000	2017	699.2	700.5	6011156	1479	Perré surmonté de déflecteur en béton
													CAMoy/ml
													1 741 €
													CAMini/ml
													1 479 €
													CAMaxi/ml
													2 004 €

Tunage et technique végétale

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût enrochements (€)	Année	Indice TP02	Coût (€ octobre 14)	Coût enrochements (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût massique enrochements (€ octobre 2014/t)	Coût linéaire béton HT (€ octobre 14/m)	Observation
Qual Gorin	St Gilles-Croix-de-Vie (44)	CC Pays de Saint Gilles	Confortement en enrochements et construction muret béton	Etat d'avancement PSR	700	3		495000		2015 juin	697.9	496844	496844	710	n.c.	n.c.	Faible exposition hydrodynamique. Tunage en pied et protection végétale du talus sur un tiers de la briqueur.

Terrassement et enrochements – Travaux « généralement en continu »

	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume terrassement (m³)	Enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût terrassement HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indice TP02 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût terrassement HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût volumique terrassement HT (€ octobre 14/m³)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)	Observation	Bloc métrique	% terrassement	% enrochements	% cumulés	Enrochements t/m	Terrassement m³/ml
	Château d'Oléron (17) – Pointe Blanche	CD17	réfection d'urgence – reprise terrassement et enrochements – ré-ensablement	Fiche synthèse (coût final)	500	2 à 3	2000	8980	195358	26040	106800	2010 juin	656,4	208483	27789	113975	417	14	13	20 % d'enrochements d'apport	300/100kg et 100/300kg	13%	55%	68%	17,96	4
	Portes en Ré(17) – La Patache	CD17	réfection d'urgence – reconstitution de 2 sections de digue et réparation de 2 épis	Fiche synthèse (coût final)	130	2,5 à 3	540	1122	65199	15883	24907	2010 juin	656,4	69579	16950	26580	535	31	24	En plus des travaux sur les digues, réparation d'épis pour environ 22000€. L'estimation initiale prévoyait un coût deux fois supérieur.	100/300kg et 300/100kg	24%	38%	63%	8,63	4,15
	Loix (17) – digue inférieure du Grouin	CD17	Réfection d'urgence – confortement de la digue du Grouin avec apport d'enrochements et de bri.	Fiche synthèse (coût final)	214	2 à 3	800	1700	85000	19760	41040	2010 juin	656,4	90711	21088	43797	424	26	26	Sur les 1700 t d'enrochements, apport de 1200 t. Zone d'emprunt du bri à une distance supérieure à 1 km.	300/100kg	23%	48%	72%	7,94	3,74
																					CAMoy/ml	CAMoy/m³	CAMoy/T			
																					459 €	24 €	21 €			
																					CAMini/ml	CAMini/m³	CAMini/t			
																					417 €	14 €	13 €			
																					CAMaxi/ml	CAMaxi/m³	CAMaxi/t			
																					535 €	31 €	26 €			

Terrassement et enrochements – Travaux ponctuels d'urgence

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume terrassement (m³)	Masse enrochements (t)	Coût terrassement HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût terrassement HT (€ octobre 14)	Coût encoche HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût volumique terrassement HT (€ octobre 14/m³)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)	Observation	Blocage étiré	% encoche remblayée	% terrassement cumulé	Enrochements t/ml	Terrassement t/m³		
MD17120	Arçes sur Gironde (17)	CD17	réfection de l'ensemble de la surface de protection	Fiche synthèse	394	2	499	1554	43456	12475	20380	2010 juin	656,4	700,5	46376	21749	118	27	14	Remaniement d'enrochements et rechargement en terre.	300/1000kg	47%	29%	76%	3,9	1,3
MP17630-1	La Flotte en Ré (17) – digue du Préau à la Maladerie	CD17	réfection de l'ensemble de la surface de protection	idem	303	3	100	2394	72516	4343	35512	2010 juin	656,4	700,5	77388	37898	255	46	16	Pose d'un matelas de gabions représentant 37 % du coût.	100/300kg et 1000/3000kg	49%	6%	55%	7,9	0,3
MP17730	Port des Barques (17)	CD17	réfection ponctuelle	idem	3000	2	0	3883	67631	0	59892	2010 juin	656,4	700,5	72175	63916	24	n.c.	16	Remaniement et apport ponctuel d'enrochements	1000/3000kg	89%	0%	89%	1,3	0,0
MD17370-2	Saint Trojan les Bains (17) – Digue Pacaud	CD17	reprise talus arrière	idem	1000	2	1980	614	40522	22100	9400	2010 juin	656,4	700,5	43244	10032	43	12	16	414 t d'enrochements réemployés et 200 t d'apport		23%	55%	78%	0,6	2,0
MD17450	Fouras (17) – de l'espérance à Fort Vasoux	CD17	reprise talus arrière	idem	1800	2,8	1083	451	64816	44460	10022	2010 juin	656,4	700,5	69171	10695	38	44	24	Remaniement d'enrochements et rechargement en terre.		15%	69%	84%	0,3	0,6
MD17680	Portes en Ré(17) – lieu-dit « Lileau des Niges »	CD17	élargissement ponctuel de la digue, exhaussement de 20 à 50 cm	idem	1200	3,9	5270	970	141825	101375	22004	2010 juin	656,4	700,5	151353	23482	128	21	24	En plus des 1200 m comptabilisés, deux autres secteurs ont fait l'objet de travaux.	100/200kg	16%	71%	87%	0,8	4,4
MD17670	La Couarde sur mer(17) – lieu-dit Bournonville	CD17	élargissement ponctuel de la digue	idem	400	2,5	140	1855	59870	5950	38550	2010 juin	657,4	700,5	63795	41077	159	45	22	Fourniture de 1000 t d'enrochements et réutilisation de 400t.	1000/3000kg	64%	10%	74%	4,6	0,4
	Fouras (17) – Pointe de la Fumée	CD17	reprise ponctuelle	idem	2000	2 à 3	2600	4845	169761	39640	78675	2010 juin	656,4	700,5	181166	83961	91	16	17	La pose de gabions représente 17 % du coût.		46%	23%	70%	2,4	1,3
																			CAMoy/ml	CAMoy/m³	CAMoy/t					
																			107 €	30 €	19 €					
																			CAMini/ml	CAMini/m³	CAMini/t					
																			24 €	12 €	14 €					
																			CAMaxi/ml	CAMaxi/m³	CAMaxi/t					
																			255 €	46 €	24 €					

Entretien ou réparation

Maçonnerie

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H(m)	Surface maçonnerie (m²)	Coût HT (€)	Coût maçonnerie HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€) octobre 14	Coût maçonnerie HT (€) octobre 14	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût surfacique maçonnerie HT (€ octobre 14/m²)	Observation	% maçonnerie
	Kerpenhir Loperec (56)	Conservatoire du littoral Bretagne	restauration de la digue de Brénéguy	Marché de travaux	130	2 à 3	841	126596	126596	2009 mars	617,8	700,5	143542	143542	1104	171	Les dépenses se répartissent à parts égales entre le rejointoiement et les autres interventions de reprises des parements et des vannes.	1

Gabion

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H(m)	Surface gabion (m²)	Coût HT (€)	Coût gabion HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€) octobre 14	Coût gabion HT (€) octobre 14	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût surfacique gabion HT (€ octobre 14/m²)	Observation	% gabion
MD 17450-2	Fouras (17)	CD17	réfection d'urgence	Fiche synthèse (coût final)	350	1	240	47130	34770	2010 juin	656,4	700,5	50296,41	37106,01	144	155	Les gabions représentent 60% du coût.	0,74
MD17630-2	La Flotte en Ré (17)	CD17	réfection d'urgence	Fiche synthèse (coût final)	303	0,7	203	29905	27405	2010 juin	656,4	700,5	31914,16	29246,2	105	144	Le coût ne comporte que les installations de chantier et gabions.	0,92

CAMoy/ml	CAMoy/m²
125 €	149 €
CAMini/ml	CAMini/m²
105 €	144 €
CAMaxi/ml	CAMaxi/m²
144 €	155 €

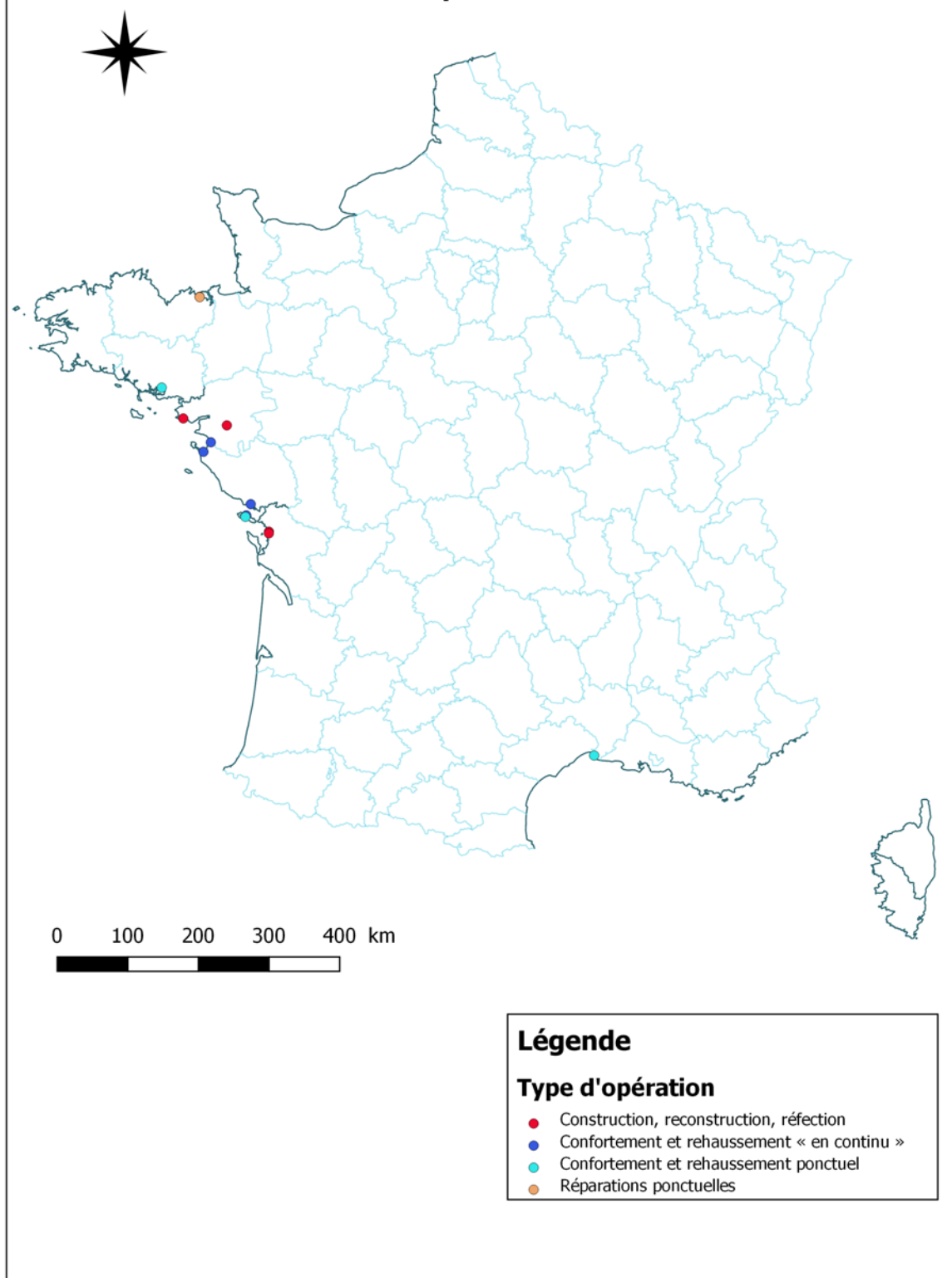
Béton (sur maçonnerie)

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume béton (m³)	Surface béton (m²)	Coût HT (€)	Coût béton HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût béton HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût volumique béton HT (€ octobre 14/m³)	Coût surfacique béton HT (€/m² octobre 14)	Observation	% coût béton	
MP147 10	Vierville-sur-mer (14)	Vierville-sur-mer	Réparation par une reconstitution en béton du parement maçonné.	Marché	20	2	14	40	6394	2940	2002 déc	474	700,5	9449	4345	472	310	109	La réfection du parement est effectuée sur 40 m².	0.46

Colmatage de brèches par liaisonnement d'encrochements avec du béton

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume béton (m³)	Surface parement (m²)	Coût HT (€)	Coût béton HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût volumique béton HT (€ octobre 14/m³)	Coût surfacique HT (€ octobre 14/m²)	Observation	% coût béton	
MD175 90-A-2	Saint Clément-des-Baleines (17)	CD17	Calage par béton des enrochements déposés pour colmater des brèches sur digues maçonnées (490 m), épaulement arrière des parapets (200 m), rejointoiement et reprises	Fiche synthèse (coût final)	1000	5	897	840	581177	380826,1	2010 juin	656.4	700.5	620223	406412	620	453	738	Cette opération n'intègre pas l'apport des enrochements en première urgence. Les deux tiers du montant de l'opération sont consacrés à la mise en œuvre de béton sur les 490 m de brèches (soit 830€/ml hors apport d'enrochements).	0,66

Carte de localisation des opérations sur les digues sans parement



Source : tableaux en annexes

Réalisé par : Cerema Eau mer et fleuves

Terrassement

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût terrassement HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Observation	Coût terrassement HT (€)	% coût terrassement
La Minoterie	44	Cap Atlantique	Construction digue	DQE	1600	1,3	664962	2015 mars	696,6	700,5	668685	206612	418	Hauteur de l'ouvrage y compris fondations sur 0,5 m. La hauteur hors sol est comprise entre 0,6 et 1,3 m. Fortes dépenses en génie civil (115 k€), en VRD (141 k€) et en mesures compensatoires (159 k€)	205462	31%
Bôles de Goustan	44	Cap Atlantique	Construction digue	DQE	800	3,1	945995	2015 mars	696,6	700,5	951291	786499	1189	Hauteur de l'ouvrage y compris fondations sur 50 cm.	782120	83%
Digue de retrait réserve naturelle marais d'Yves	Châtelailon (17)	Ville de Châtelailon	Construction d'une digue de retrait	Etat d'avancement PAPI 03/08/15	4000	2 à 2,5 m	3720000	2015 août	699,2	700,5	3726916	3726916	932	Le coût ne représente que les travaux. Dans cette enveloppe, l'apport et la mise en oeuvre d'argile coûte 1M€. Les études, les mesures d'accompagnement et de suivi et les acquisitions foncières portent le montant de l'investissement à 6,5 M€.	3720000	100%
Digue de Chaudières à Yves	Châtelailon (17)	Ville de Châtelailon	Construction d'une digue de retrait	Etat d'avancement PAPI 03/08/15	1400	2 à 2,5 m	1400000	2015 août	699,2	700,5	1402603	1402603	1002		1400000	100%

CAMoy/ml
885 €
CAMini/ml
418 €
CAMaxi/ml
1 189 €

Confortement et rehaussement « en continu »

Terrassement

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H(m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût octobre 14 HT (€)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Observation
Digues de Grues et du Grenouillet	Grues (85)	Syndicat Mixte du Marais Poitevin Bassin du Lay	Rehaussement de 1m	Marché	1800	2	517338	2014 janv	707,3	700,5	512364	285	Utilisation de terre pour confortement et protection de deux ouvrages hydrauliques en enrochements.
Loix Est - Fossé Martineau et levée de la Tonille	Île de Ré, Loix (17)	CD17	Rehaussement de 1,5 m de digues de second rang	Suivi d'avancem ent PAPI	1640	2 à 3	400000	2014 janv	707,3	700,5	396154	242	Matériau : remblai, bri, terre végétale, géogridde
PAPI Action 7-4 – Glagées	Bouin (85)	Syndicat mixte Baie de Bourgneuf	Réhabilitation de la digue de second rang	PAPI phase AVP	1060	3 à 4	520000	2017 janv	699,2	700,5	520967	491	Merlon de terre de hauteur et géométrie variable. Sa cote est fixé à 4,20 m NGF quand la digue de premier rang est à 6,0 m NGF.
PAPI Action 7-7 – Digues sud du passage du Gois	Beauvoir (85)	Syndicat mixte Baie de Bourgneuf	Suppression des points bas et tunage en pieux bois avec géogrillage + création d'une vanne	PAPI phase AVP	1800	4	1070000	2017	699,2	700,5	1071989	596	
													CAMoy/ml
													403 €
													Hauteur 2 à 3m
													263 €
													Hauteur 3 à 4m
													544 €
													CAMini/ml
													242 €
													CAMaxi/ml
													596 €

Confortement et rehaussement ponctuels

Terrassement

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H(m)	Volume terrassement (m³)	Coût HT (€)	Coût terrassement (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût octobre 14 HT (€)	Coût terrassement HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût volumique terrassement HT (€ octobre 14/m³)	Observation
	Le Grau-du-Roi (30)	Le Grau-du-Roi	Surélévation de pistes dans le cadre d'une ligne de défense en retrait	Détail estimatif	2550		14000	316910	316910	2014 avril	701,7	700,5	316368	316368	124	23	
	La Couarde-sur-mer (17) – Digue de la Percotte	CD17	Réfection d'urgence – reprise de la levée en terre – rétablissement de la hauteur sur un niveau d'environ 1 m.	Fiche synthèse	400	2 m	2150	75000	56535	2010 juin	656,4	700,5	80039	60333	200	28	Calcul effectué en considérant une zone d'emprunt à une distance supérieure à 1 km.
	Séné (66)	Conservatoire du littoral Bretagne	Rehausse de 1 m de digue d'été	Détail estimatif	290			19400		2005 juin	520,3	700,5	26119		90		
														CAMoy/ml	CAMoy/m³		
														138 €	25 €		
														CAMini/ml	CAMini/m³		
														90 €	23 €		
														CAMaxi/ml	CAMaxi/m³		
														200 €	28 €		

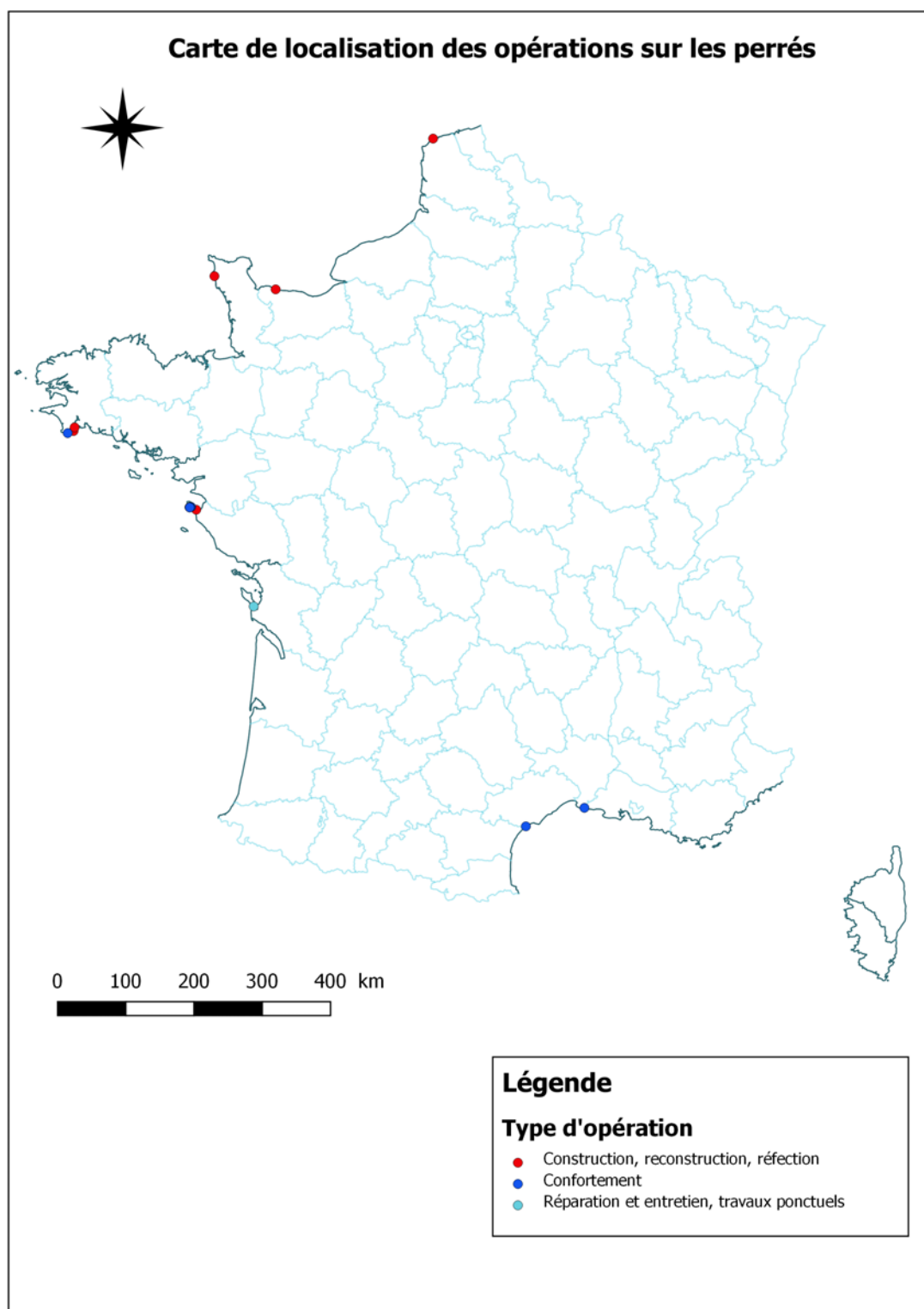
Réparations ponctuelles

Terrassement

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H(m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Observation
MD 22650 (2)	Ploubalay (22)	Conservatoire du littoral Bretagne	Réfection d'urgence – comblement de brèches	Cahier des charges	40	2 m	2744	2006 mars	546,8	700,5	3516	88	Prix unitaires à l'heure d'utilisation du matériel.
MD 22650 (3)	Ploubalay (22)	Conservatoire du littoral Bretagne	Reprise ponctuelle de sections dégradées	Cahier des charges	300	2 m	8700	2008 mars	606	700,5	10056	34	idem
										CAMoy/ml			
										61 €			
										CAMini/ml			
										34 €			
										CAMaxi/ml			
										88 €			

ANNEXE E

TABLEAUX DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX PERRÉS



Source : tableaux en annexes

Réalisé par : Cerema Eau mer et fleuves

Construction, reconstruction, réfection

Enrochements

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût s HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)	Observation	% coût enrochements
Pointe de la fosse	Barbâtre (85)	CCIN	protection cordon dunaire par un perré bas	http://iledehoir-moulouet.org/protectionfacealamer/2014/06/	300	2	n.c.	110000	110000	2014 avril	701,7	700,5	109812	109812	366	n.c.	Protection de la culée du pont desservant l'île.	
MP14710	Colleville-sur-mer (14)	CG 14	Prolongement d'un perré en enrochements	DGD	70	3 à 4	998	29718	20564	2002 fév	459,7	700,5	45285	31336	647	31	Distance carrière chantier : 80 km, 150 à 300 kg & 1 à 2 t	69%
MP29750	Loctudy (29)	Loctudy	Mise en place	DGD	90	3,5	2297	43030	24041	2001 déc	455,7	700,5	66145	36955	735	16	50 à 250kg et 1 à 2t	56%
MP50340	les Fleux (Scioto) (50)	DDTM50	8200 t fournies et posées pour 3000 t remanées.	Marché	350	n.c	13824	279995	262423	2009 mars	617,8	700,5	317475	297551	907	22	Distance carrière-chantier : 80 km, 300 à 1 t ; 1 à 2,5 t ; 3 à 5 t	94%
Les Eloux	La Guérinière (85)	CCIN	construction en urgence	site internet http://iledehoir-moulouet.org/	350	4 à 5	n.c.	400000	n.c.	2011	680,9	700,5	411514	n.c.	1176	n.c.		
Les Eloux	La Guérinière (85)	CCIN	Enrochements	sulvi PAPI	45	4 à 5	n.c.	45000	n.c.	2016 nov	699,2	700,5	45084	n.c.	1002	n.c.		
MP29980	Ile Tudy et Saintes Marine (29)	SMBLNL	protection cordon dunaire	Marché	570	5 à 6	36300	403339	289394	1995 fév	406	700,5	695909	499312	1221	14	50 à 300 kg et 1 à 2t	72%
													CAMoy/ml					
													865 €					
													CAMini/ml					
													366 €					
													CAMaxi/ml					
													1 221 €					

Béton

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume béton (m³)	Coût HT (€)	Coût béton HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût béton HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût volumique béton HT (€ octobre 14/m³)	Observation	% béton
MP62231	Sangatte (62)	SDDC	Construction	Avenant 1	383,6	6 m (hors fondation)	810	515927	261955	2007 oct	585,6	700,5	617156	313353	1609	387	Les palplanches et la démolition de béton représentent respectivement 19 % et 10 % du coût. Pente 3H/2V.	0,51

Confortement

Enrochements

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)	Observation	Blocométrie	% coût enrochements	enrochements /ml
MP13 460	Saintes Maries de la Mer (13)	Symadrem	Confortement & reprofilage	DGD	225	3,3	21240	628839	565335	2009 juill	625,3	700,5	633323	633323	2815	30	Les coûts ont été calculés sur la base de -15% de l'estimation sur la foi du gestionnaire de l'ouvrage.	1 à 2t, 2 à 3t	1	94,4
	Valras-Vendres	SIVOM	Mise en place	Marché	300	2,8	15030	698621	n.c	2006 oct	565,5	700,5	865401	n.c	2885	58	Cette Méditerranée ; densité 1,8 (enrochements)	2 à 4 t	n.c	50,1
MP29 730	Treffriagat (29)	Treffriagat	Réfection et renforcement de la protection du cordon dunaire	DGD	250	6	12609	149730	128796	2005 nov	533,5	700,5	196600	169112	786	13	Réutilisation de 2500 t d'enrochements.	50 à 250kg ; 1 à 2t et 2 à 3t	86%	50,44
																	CAMoy/ml			
																	2 162 €			
																	CAMini/ml			
																	786 €			
																	CAMaxi/ml			
																	2 885 €			

Confortement

Béton

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Pente	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Observation
Avenue des Pins	La Guérinière	CC Noirmoutier	Renforcement en pied et rejointoiement et injection	http://ilede-noirmoutier.org/protecti-onfacealamer/2013/03/	215	4 à 5	3H/1V	400000	2013 mars	706,7	700,5	396491	1844	Pose de palplanches et d'une longrine béton en pied. Rejointoiement et injection de la maçonnerie
PAPI tranches 4 (secteur Homardiers)	La Guérinière	CC Noirmoutier	Renforcement en pied et rejointoiement et injection	http://ilede-noirmoutier.org/protecti-onfacealamer/2014/11/	200	5 (hors fondatio n)	1H/2V	300000	2014 nov	697,9	700,5	301118	1506	Pose de palplanches et d'une longrine béton en pied. Rejointoiement de la maçonnerie. Remplacement du muret en tête.
PAPI tranches 5 (secteur du Fier et Mortrif)	La Guérinière	CC Noirmoutier	Renforcement en pied et rejointoiement et injection	suivi PAPI	170	5 (hors fondatio n)	1H/2V	230000	2016 nov	699,2	700,5	230428	1355	Pose de palplanches et d'une longrine béton en pied. Rejointoiement de la maçonnerie.
PAPI tranches 5 (secteurs du Fier et Mortrif)	La Guérinière	CC Noirmoutier	Rejointoiement et injection	suivi PAPI	405	5 (hors fondatio n)		290000	2016 nov	699,2	700,5	290539	717	La fondation sur toit calcaire exonère des travaux en pied.
										CAMoy/ml			1 568 €	
										CAMin/ml			1 355 €	
										CAMax/ml			1 844 €	

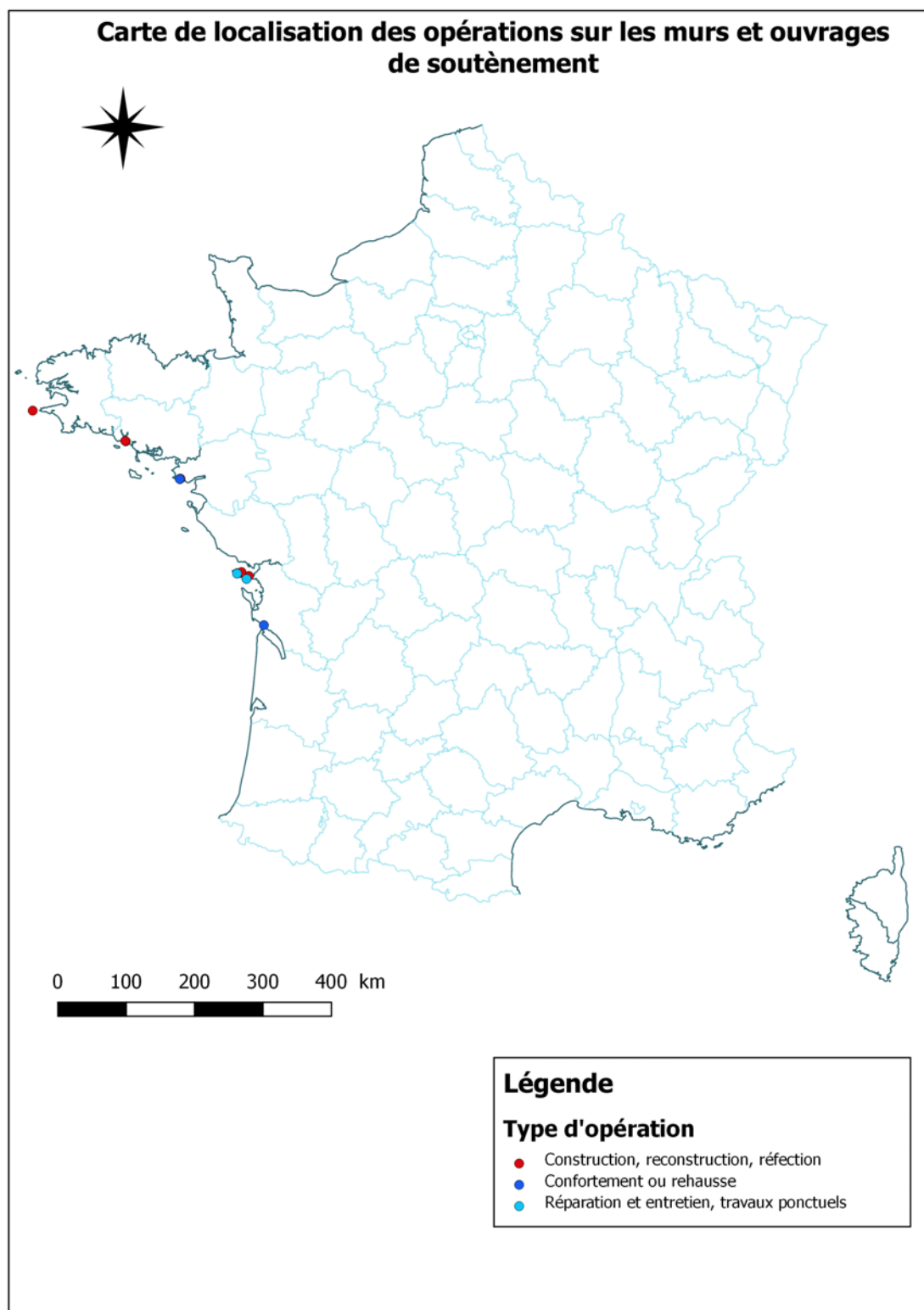
Entretien ou réparation - Travaux ponctuels

Entretien joints parement béton

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume béton (m³)	Coût HT (€)	Coût béton HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût béton HT (€ octobre 2014)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût volumique béton HT (€ octobre 14/m²)	Observation
MP17370	Saint Trojan les Bains (17) – digue de la petite plage	CD17	réfection de joints de liaison et injection de fissures	Fiche synthèse (coût final)	800	n.c	9	40522	3276	2010 juin	656,4	700,5	3496	54	388	Réfection de 70 m de joint avec pose d'une tôle en acier inox

ANNEXE F

TABLEAUX DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX MURS ET OUVRAGES DE SOUTÈNEMENT



Source : tableaux en annexes

Réalisé par : Cerema Eau mer et fleuves

Muret en béton et barrières anti-submersion – fondation de profondeur 1 m

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT (€)	Coût génie civil HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût muret et barrières HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût linéaire HT muret et barrières (€ octobre 14/ml)	Observation
quai Rageot	44	Cap Atlantique	muret en béton et batardeaux alu	DQE	535	0,4	542000	312700	2015 mars	696,6	700,5	545034	314451	1019	588	172000 € consacrés aux travaux de VRD
quai Inverness	44	Cap Atlantique	muret et jardinières en béton et batardeaux alu	DQE	350	1,2	369147	275625	2015 mars	696,6	700,5	371214	277168	1061	792	Les jardinières représentent 2/3 du linéaire d'endiguement. 30 000 € de travaux de VRD.
quai Inverness	44	Cap Atlantique	muret et jardinières en béton et batardeaux alu	DQE	350	1,2	400440	273835	2015 mars	696,6	700,5	402682	275368	1151	787	Les jardinières représentent 2/3 du linéaire d'endiguement. 61 000 € de travaux de VRD.
Secteur du port – digue Est et môle Nord	Île de Ré, La Flotte (17)	CD17	Construction muret en béton armé habillé avec de la pierre de taille	Suivi d'avancement PAPI	514	0,7 à 1,2	1063000	n.c.	2017	699,2	700,5	1064976	n.c.	2072	n.c.	Ce coût comprend l'installation de 2 batardeaux en aluminium, ainsi que le renforcement ponctuel de la digue.
Loix Est – Place du port	Île de Ré, Loix (17)	CD17	Construction muret en béton armé + batardeau en aluminium	Suivi d'avancement PAPI	90	n.c.	162000	n.c.	2017	699,2	700,5	162301	n.c.	1803	n.c.	
													CAMoy/ml	CAMoy/ml	CAMoy/ml	
													1 325 €	722 €	722 €	
													CAMini/ml	CAMini/ml	CAMini/ml	
													1 019 €	588 €	588 €	
													CAMaxi/ml	CAMaxi/ml	CAMaxi/ml	
													2 072 €	792 €	792 €	

Construction, reconstruction, réfection

Mur en béton – fondation de profondeur 1 m

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volume béton (m³)	Coût HT (€)	Coût béton HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût béton HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût volumique béton HT (€ octobre 14/m³)	Observation	% béton
MO17740	Sainte Marie de Ré (17)	CD17	Reconstruction d'un muret de protection	Marché	28	2	60	41800	20317	2010 juin	656,4	700,5	44608	21682	1593	361	mur en T	0,49
MO29990	Ile de Sein (29)	Ile de Sein	construction mur poids en béton	Marché	70	2,6	243	267017	74214	2010 juin	660,6	700,5	283145	78696	4045	324	L'installation de chantier et les études représentent 64 % du coût. La position insulaire du chantier explique cette particularité.	0,28
					CAMoy/ml		CAMoy/m3											
					2 819 €		343 €											
					CAMini/ml		CAMini/m3											
					1 593 €		324 €											
					CAMaxi/ml		CAMaxi/m3											
					4 045 €		361 €											

Muret en maçonnerie – fondations superficielles

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Surface maçonnerie (m²)	Coût HT (€)	Coût maçonnerie HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût maçonnerie HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût surfacique HT maçonnerie (€ octobre 14/m²)	Observation	% maçonnerie
MO56680(3)	Gâvres (56)	Gâvres	construction muret de maçonnerie	Facture	205	0,7	146	27984	19977	2001 oct	455,4	700,5	43045	30729	210	211	maçonnerie de modelons	0,71
MO56680	Gâvres (56)	Gâvres	construction muret en béton armé	Marché	210	0,7	147	28980	28980	2005 mai	518,8	700,5	39130	39130	186	266	Largeur 0,4 m.	1
	Loix (17) – levée de cul d'âne	CD17	reconstruction de parapet	Fiche synthèse (coût final)	320	0,5	160	30000	24727	2010 juin	656,4	700,5	32016	26388	100	165	2 rangées de parpaings revêtus d'un enduit.	0,82
					CAMoy/ml		CAMoy/m²											
					165 €		214 €											
					CAMini/ml		CAMini/m²											
					100 €		165 €											
					CAMaxi/ml		CAMaxi/m²											
					210 €		266 €											

Palplanches

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Observation
Loix Est – Ouest Moulin	Ile de Ré, Loix (17)	CD17	Installation d'un rideau de palplanches en acier	Suivi d'avancement PAPI	120	1 m hors fondation	140200	2017	700,5	140461	1171	

Confortement ou rehausse

Mur en béton

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT (€)	Coût génie civil HT (€)	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût génie civil (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût linéaire génie civil HT (€ octobre 14/m)	Observation
qual Sandeau	44	Cap Atlantique	Rehausse d'un muret en béton et balardeaux alu	DOE	550	1	267370	200650	2015 mars	696,6	268867	201773	489	367	Rehaussement d'un muret béton existant, donc pas de fondation à réaliser. 51 000 € de travaux de VRD.

Confortement falaise par structure en béton et reconstruction parement maçonné

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	Volume béton (m³)	Surface maçonnerie (m²)	Coût HT (€)	Coût HT béton (€)	Coût maçonnerie € HT	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût béton HT (€ octobre 14)	Coût maçonnerie HT (€ octobre 14)	Coût volumique béton HT (€ octobre 14/m³)	Coût surfacique maçonnerie (€/m² HT octobre 14)	Observation	% béton	% maçonnerie
MO17200	Royan (17)	CD17	Purge et reprise du front de falaise par structure bétonnée – réfection des surfaces maçonnées en surplomb	Détail estimatif final	265	230	370109	198397	62928	2010 Juil	656,4	700,5	211726	67156	799	292	béton injecté à la pompe. 57 000 € de démolition au BRH et d'évacuation	0,54	0,17

Entretien ou réparation - Travaux ponctuels

Muret en maçonnerie

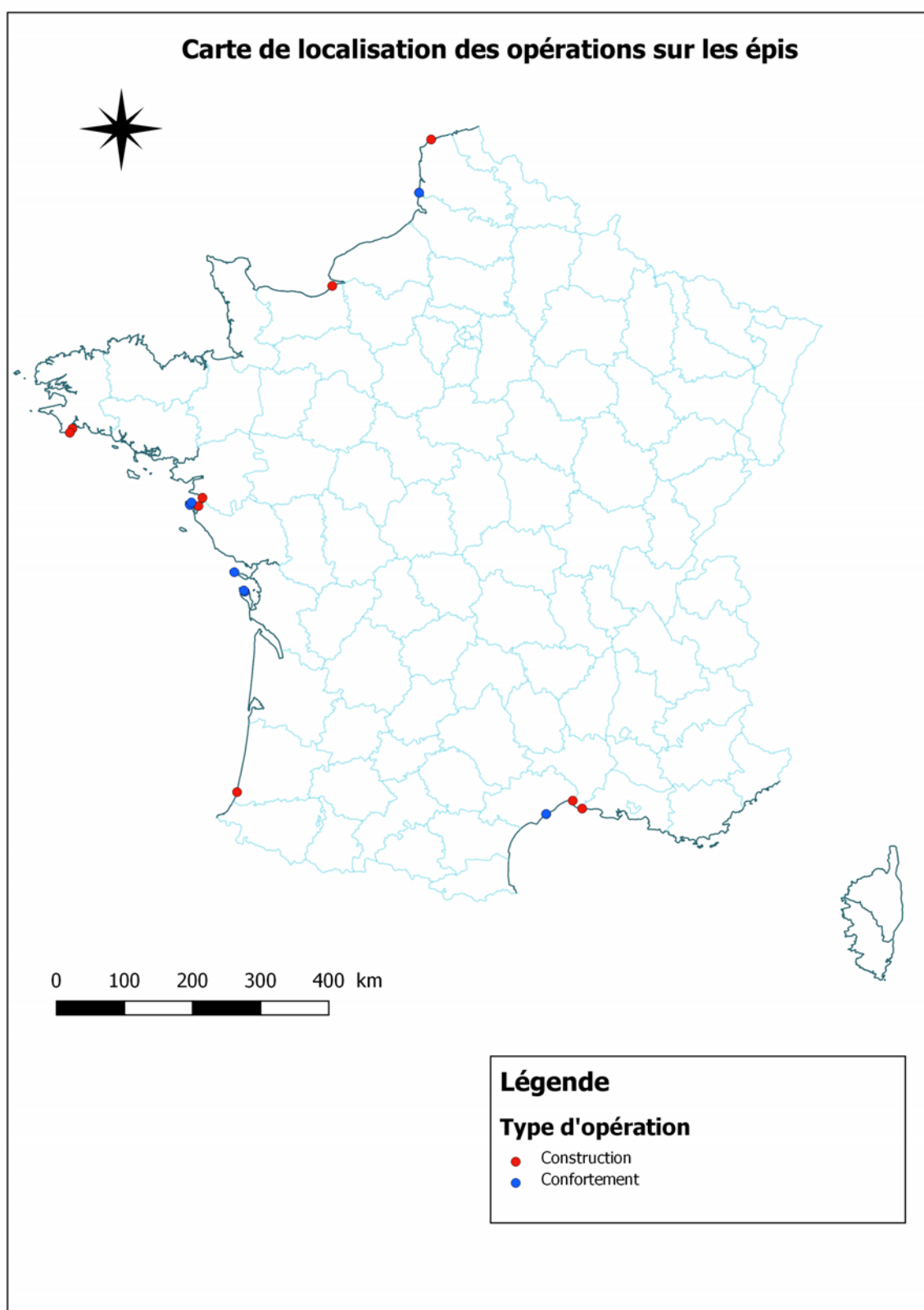
Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Surface maçonnerie (m²)	Coût HT (€)	Coût maçonnerie HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût maçonnerie HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût surfacique HT maçonnerie (€ octobre 14/m²)	Observation	% maçonnerie
MD17590-B	Als en Ré (17)	CD17	Réfection d'urgence – travaux ponctuels – reprise parapet manquant, épaullement arrière par matériaux argileux, reprise et rejointoiement de maçonnerie	Fiche synthèse (coût final)	3300	2 à 3	2667	407769	239331	2010 juin	656.4	700.5	435165	255410	132	96		0.59

Gabion – Reconstitution de gabions disloqués

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Surface gabion (m²)	Coût HT (€)	Coût gabions HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût gabions HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût surfacique gabions HT (€ octobre 14/m²)	Observation
MO17740	Sainte Marie de Ré (17)	CD17	Reconstitution de gabions disloqués	Marché	350	1 m hors fondation	350	250900	250900	2010 juin	656.4	700.5	267757	267757	765	765	La fourniture et mise en œuvre des cages d'armatures représentent l'essentiel des dépenses (201250 €). Calage à l'arrière et aux extrémités avec des enrochements calcaires.

ANNEXE G

TABLEAUX DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX ÉPIS



Source : tableaux en annexes

Réalisé par : Cerema Eau mer et fleuves

Construction

Construction en enrochements

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)	Observation	% coût enrochements
MA40130(2)	CapBreton (40)	Capbreton	construction	Marché	311	3 à 4 m	1600	1214700	150400	2007 août	700,5	1245203	910832	4004	94	Coût avec avenant. Enrochements en Ophile (dense & résistant à la mer) en provenance de Souraide (43 km). 3-5T	73%
ME13460	Saintes Maries de la Mer (Ouest) (13)	Symadrem	construction	DGD	239	3,7	22400	768349	665274	2009 juil	700,5	860753	745281	3601	33	Hauteur variable de 1,80 à 5,60m. Sur la foi du MO, les coûts ont été calculés sur la base de -9% de l'estimation. Enrochements 50 à 500kg; 0,5 à 1 t; 2 à 3t; 3 à 5t	87%
ME29980	Ile Tudy (29)	SMBLNL	réalisation	DGD	100	2	1720	45147	29756	2002 juil	700,5	67360	44396	674	26	compris dans travaux rechargement de plage 2618m ³ = 9163 € soit 3,5€/m ² . Enrochements 2 à 3t.	66%
ME62600	Berck-sur-mer (62)	SIBVA	prolongement	DGD	100	1,5	2200	47282	46787	2000 août	700,5	72424	71665	724	33	300 à 800 Kg	99%
	Lido de Frontignan (34)	Thau Agglo	Création de 3 épis	DGD	155	1,5	n.c	291043	n.c	2014	700,5	290545	n.c	1874	n.c	+ déconstruction partielle de 3 épis dont le noyau était en TV (au total 75m)	#VALEUR !
	Boucanet (30)	SIVOM	3 épis en enrochements 0,5-2t	DGD	315		7686	211369	211369	2008 octobre	700,5	237016	237016	752	31		100%
Les Eloux – Pointe de la Loire	L'Epine (85)	CCIN	création de 3 épis de 100 m, de 3 épis de 130 m et déconstruction d'un sixième	Tableau de suivi financier du PAPI	690	2		1222073	1222073	2014 nov	700,5	1226625	1226625	1778	n.c.	L'opération prévoit par ailleurs 2000 m de ganivelles et 1000 m de clôture (poteau et fil lisse). Coût d'entretien prévisionnel : 25800€/an.	
															CAmoy/t	Valeurs pour les épis de hauteurs 1 à 2 m	CAmoy/ml
															1 915 €		1 160 €
															CAmini/t		CAmini/ml
															26 €		674 €
															CAmax/t		CAmax/ml
															4 004 €		1 874 €

Construction

Construction en bois

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Surface bois (m²)	Volume bois (m³)	Coût HT (€)	Coût HT bois (€)	Indice TP02 octobre 14	Indice TP02	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût HT bois (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût surfacique bois HT octobre 14 (€/m²)	Coût volumique bois HT (€ octobre 14/m³)	Observation
ME14 113	Villerville (14)	CG14	Reconstruction 4 épis	DGD	103	2,75	283	28	44754	31251,66	700,5	465,8	2002 juin	700,5	67304	46998	653	166	1702	Bois : chêne : poteaux (hauteur 3,0 m), planches (hauteur 2,75 m) et liernes
	Noirmoutier-en-Ile (85)		Création d'un épi en bois + rechargement	Fiche synthèse	90	n.c	n.c	n.c	89000	n.c	700,5	520,1	2004 juin	700,5	119870	n.c	1332	n.c	n.c	Epi constitué de poteaux et de planches. Rechargement de 4000 m3 de sable
	Les Moutiers-en-Reiz		Opération annuelle de remplacement de 4 épis sur 80.	Fiche synthèse	160	n.c	n.c	n.c	70000	n.c	700,5	465,8	2002 (date approximative)	700,5	105271	n.c	658	n.c	n.c	Epis en pin traité constitués de poteaux et de planches. Epaulement avec des enrochements (déjà en place).
	Sangatte		Remplacement des épis constitués de pieux bois (22 épis transversaux de 100 m de long et 4 épis longitudinaux de 150 m de long)	Marché de travaux	2800	6	16800	1704	1129200	1129200	700,5	699,2	2016 nov	700,5	1131299	1131299	404	67	664	épis de 100 m constitués chacun de 167 pieux espacés de 60 cm, de longueur 6 m et de diamètre 0,30m. Pieux en chêne fichés de 4 m dans le sol. Le chantier comprend la dépose des pieux existants (19 épis transversaux et 4 épis longitudinaux)

CAMoy/ml	881 €
CAMin/ml	635 €
CAMax/ml	1 300 €

Implantation de géocomposites injectés de sable

Id	Lieu & Département	Maitre ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Observation
	Plobannaec-Lesconit (29)	Plobannaec-Lesconit	implantation de 5 épis type stablage	DGD	175	0,7	268845,64	Nov 2004	523,5	700,5	359745	2056	Géocomposite injecté de sable. Largeur de 2m. Ancrage sur 1m. Espacement de 50m.

Réparation ou confortement

Réparation ou confortement en enrochements

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/ml)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)	Observation	% coût enrochements
ME17190	Saint Georges d'Oleron (17)	CD17	réfection d'urgence	Fiche synthèse	255	1,5	11200	209315	113800	2010 juin	656,4	700,5	223378	121446	876	11	Enrochements 0,3 à 1t	0,54
	Noirmoutier-en-l'île (85)	CDC Ile de Noirmoutier	Confortement en enrochements d'épis en béton	Fiche synthèse	200	1	n.c	127700	n.c	2002 mars	462,6	700,5	193372	n.c	967	n.c	Opération accompagnée d'un rechargement de sable.	n.c
ME62600(2)	Berck-sur-mer (62)	SIBVA	Reprofilage & confortement	DGD	1250	1,5	11800	301458	247234	2005 juin	520,3	700,5	394219	323310	315	27	Rehaussement de 0,75m, 600 m3 de déblais/remblais, dépose/repose d'enrochements en place (500 à 1000 kg et 1,5 à 3 t).	0,82
	Lido de Frontignan (34)	Thau Agglo	Restauration de 5 épis	DGD	425	1,5	n.c	225 002	n.c	2015	701,7	700,5	224617	n.c	529	n.c		n.c
															CAMoy/ml	CAMoy/t		
															672 €	19 €		
															CAMini/ml	CAMini/t		
															315 €	11 €		
															CAMax/ml	CAMax/t		
															970 €	27 €		

Réparation ou confortement par terrassement et enrochements

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volumé terrassement (m³)	Masse enrochements (t)	Coût HT terrassements (€)	Coût HT enrochements HT (€)	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût (€) octobre 14	Coût terrassement HT (€) octobre 14	Coût enrochements HT (€) octobre 14	Coût linéaire HT (€) octobre 14/m	Coût volumique terrassement HT (€) octobre 14/m³	Coût massique enrochements HT (€) octobre 14/t	Observation	Blocométrie	% coût enrochements	% coût terrassements
ME17190	Saint Georges d'Oleon (17)	CD17	réfection d'urgence	Fiche synthèse (coût final)	175	3 à 4 m	3750	7400	67500	121000	2010 juin	656.4	223378	72035	129129	1276	19	17	5 à 10 m de large à la base	300/1000kg	0.58	0.32
ME17840	La Brée les Bains (17)	CD17	réfection d'urgence	Fiche synthèse (coût final)	140	3	6800	11420	60960	170500	2010 juin	656.4	279558	65056	181955	1987	10	16	Dépose des enrochements, reconstitution du noyau TV et reconstitution du carapaçon. Reprise partielle des enrochements existants sur le site.	300/1000kg	0.65	0.23

CAMoy/ml	CAMoy/m3	CAMoy/t
1 637 €	14 €	17 €
CAMini/ml	CAMini/t	CAMini/t
1 300 €	10 €	16 €
CAMax/ml	CAMax/t	CAMax/t
2 000 €	19 €	17 €

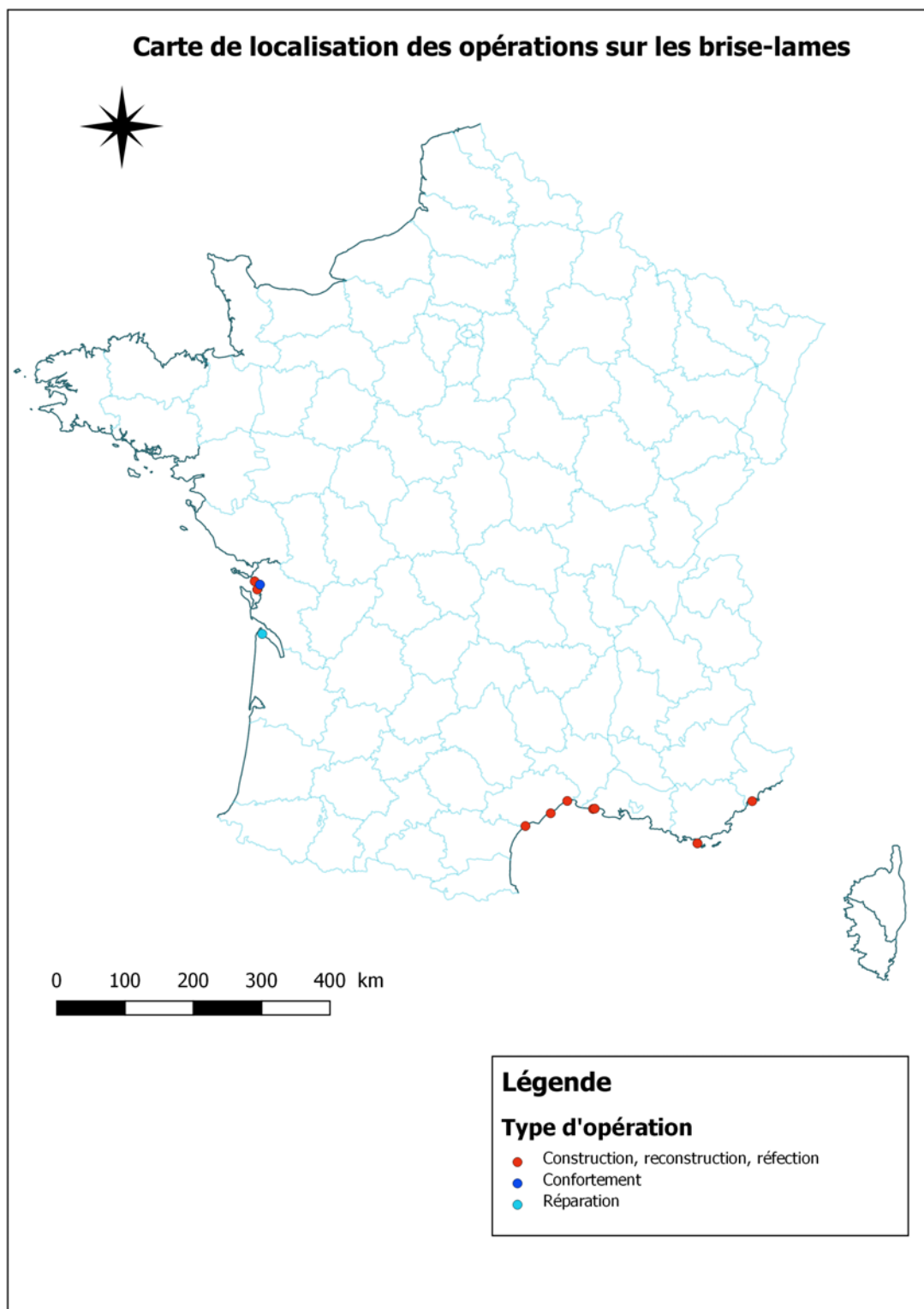
Réparation épis en béton armé

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Volumé béton (m³)	Coût HT (€)	Coût HT béton (€)	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût (€) octobre 14	Coût HT béton (€) octobre 14	Coût linéaire HT (€) octobre 14/m	Coût volumique béton HT (€) octobre 14/m³	Observation	% béton
MD17880	Portes en Ré(17)	CD17	réfection d'urgence	Fiche synthèse (coût final)	40	1	58	23400	19787	2010 juin	700.5	24972	21116	624	364	Opération conjointe à des interventions sur digues	0.85
	Noirmoutier-en-Ile (85)	CCIN	réparation		5	1	4	3160	3160	2013 juin	702.1	3153	3153	631	788		

CAMoy/ml	CAMoy/m3
627 €	576 €
CAMini/ml	CAMini/t
624 €	364 €
CAMax/ml	CAMax/t
631 €	788 €

ANNEXE H

TABLEAUX DES OPÉRATIONS DE TRAVAUX RELATIVES AUX BRISE-LAMES ET BUTÉES



Source : tableaux en annexes

Réalisé par : Cerema Eau mer et fleuves

Enrochements

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€) octobre 14)	Coût enrochements HT (€) octobre 14)	Coût linéaire HT (€) octobre 14/ml)	Coût massique enrochements HT (€) octobre 14/t)	Observation	% enrochements
	Camon (34)	SIVOM	allongement	DGD	50	4	11084	288123	288123	2008 oct	624,7	700,5	323083	323083	6462	29	Étude Cete Méditerranée : coût à la tonne calculé sur coût HT. Blocométrie : 1 à 3 t et 2 à 4 t.	1
	Valras	SIVOM	réalisation de 3 brise-lames de 65 m	Marché	195	5,5	57060	1440600	1440600	2007 oct	585,6	700,5	1723259	1723259	8837	30	Étude Cete Méditerranée : coût à la tonne calculé sur coût HT. Blocométrie : 3 à 5 t et 5 à 7 t.	1
MB13460	Saintes Maries de la mer (est) (13)	Symadrem	construction	DGD	80	1,8 à 5,6 m en section courante et musoir	25350	584684	559008	2009 juill	625,3	700,5	626236	626236	8187	25	Les coûts ont été calculés sur la base de l'estimation à laquelle a été appliqué un rabais de 9 % sur la foi du maître d'ouvrage. Blocométrie : 50 à 500 kg; 0,5 à 1 t; 0,5 à 2 t; 1 à 2 t; 2 à 3 t; 3 à 5 t.	0,96
MB13460(2)	Saintes Maries de la mer (est) (13)	Symadrem	construction	DGD	130	1,8 à 7,10 m en section courante et musoir	60600	1578049	1505031	2009 juill	625,3	700,5	1767829	1686029	13599	28	Les coûts ont été calculés sur la base de l'estimation à laquelle a été appliqué un rabais de 9 % sur la foi du maître d'ouvrage. Blocométrie : 50 à 500 kg; 0,5 à 1 t; 2 à 3 t; 3 à 5 t; 5 à 7 t.	0,95
Plage Nord de Châtelailon	Châtelailon (17)	Ville de Châtelailon	Construction d'un brise-lames	Etat d'avancement PAPI 03/08/15	180	4,5	22500	940000	940000	2014 juin	701,8	700,5	938259	938259	5213	42	Largeur variable de 4 à 8 m. 3 400 m ³ de 10-100 kg pour la couche d'assise (49€/m ³), 3 150 m ³ d'enrochements 1-3 T (59 €/m ³) et 5 950 m ³ d'enrochements 2-4 T (61 €/m ³)	
Les Boucholeurs – construction	Châtelailon (17)	Ville de Châtelailon	Construction de 2 brise-lames	Etat d'avancement PAPI 03/08/15	340	4,5	48500	1420000	1420000	2016 nov	699,2	700,5	1422640	1422640	4184	29	15 000 t de noyau 1-100 kg, 6 500 t de sous-couche 60-300 kg, 25 000 t d'enrochements 1-4t. Pour le 1-4t : fourniture 22 10€/t et pose 10€/t.	
													CAMoy/ml	CAMoy/t				
													6 577 €	30 €				
													CAMini/ml	CAMini/t				
													4 184 €	25 €				
													CAMax/ml	CAMax/t				
													8 837 €	42 €				

Construction, reconstruction, réfection

Géotubes

Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	l(m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02	Coût HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Observation	Opérations d'entretien	Coût des opérations d'entretien	Coût des opérations de surveillance	%contrôle/investissement	%réparation/investissement	% grosse réparation/investissement	% total	% total annuel
Hyères (83)	Ville de Hyères	Construction	article scientifique et entretien avec les services techniques	250	1,2	4,5	288123	2008 oct	700,5	624,7	323083	1292	Deux tubes posés côte à côte de diamètre 1,80m (hauteur finale 1m). Sable pompé aux abords de l'ouvrage. Largeur tapis anti-afouillement 10,5m	Déchirures liées aux quilles et hélices des bateaux ainsi qu'aux bois déplacés lors des tempêtes.							
Hyères (83)	Ville de Hyères	Construction d'un tube supplémentaire	entretien avec services techniques	250	1	3	123994	2012 sept	700,5	700,8	123941	496	1 rangée de tube de 1,50m positionné côte plage pour augmenter l'atténuation de la houle	Déchirures (dont une de 7 m) liées aux quilles et hélices des bateaux ainsi qu'au bois déplacé lors des tempêtes.	Opération de rapiéçage 1600 € HT la journée de travail remplacement d'un tube 30185 € HT	plongée de reconnaissance 1700 € HT	1,37%	1,29%	24,35%	27,02%	13,51%
Cannes (06)	Ville de Cannes	Construction	entretien avec services techniques	545	2,5	10	1312709	2011 juin.	700,5	680,9	1350496	2478	Deux lignes largeur totale 10m. Tirant d'eau au dessus de l'ouvrage 1m.	En 2014, avarie ouvrage déchiré. En 2013 pas de grosses réparations, 5 petites interventions de coutures.	En 2013, 10000€ (2000€ par couture), en 2014, 10000€ (remplacement d'un tube).	2 plongées par an de contrôle. Marché à bon de commande à 3000€/an	0,22%	0,74%	7,40%	8,37%	2,79%
Lido de Sète (34)	Thau Agglo	Construction	DGD	1000	3	2x6,50	2115000	2012 et 2013	700,5	706,6	2096741	2097	Deux tubes posés côte à côte de diamètre 5m (hauteur finale 3m)	remplacement de deux tubes déchirés. Réparation par couture sur d'autres.	La dépose d'un tube coûte 37500€. Son remplacement est estimé au double. Trois réparations de 6m² : 4000€.						

CAMoy/m

1 591 €

CAMini/m

496 €

CAMaxi/ml

2 478 €

Confortement

Enrochements

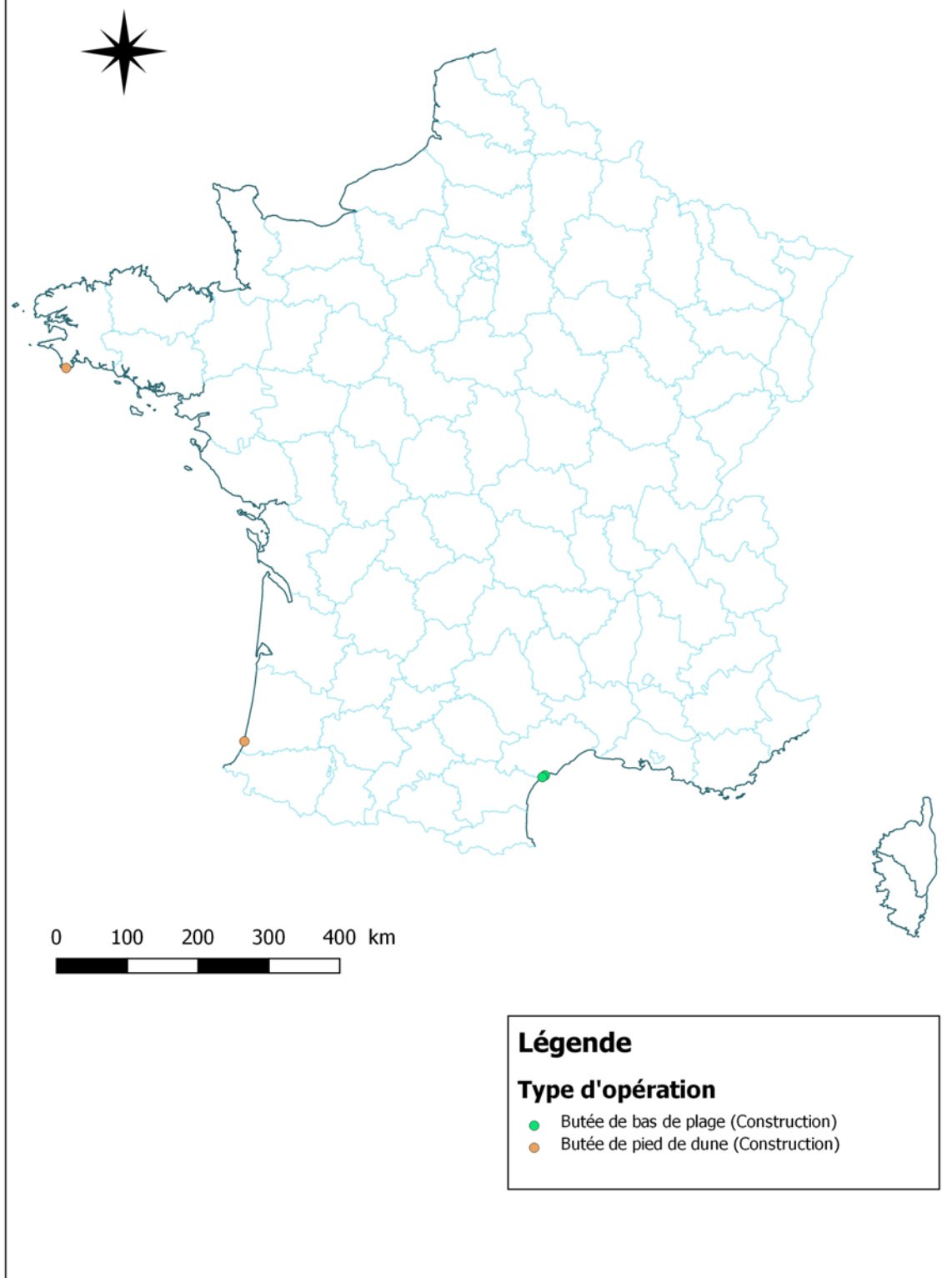
Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)	Observation	% enrochement
Les Bouches-du-Rhône – reprofilage d'un brise-lames	Châteaillon (17)	Ville de Châteaillon	Reprofilage brise-lames	Etat d'avancement PAPI 03/08/15	160	4,5	13000	440000	440000	2016 nov	699,2	440818	440818	2755	34	Les conditions d'intervention pour le reprofilage conduisent à une augmentation du prix de pose de 10€ (construction) à 12€ (reprofilage).	

Réparation

Enrochements

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)	Observation	% enrochement
MB33780	Soulac-sur-mer (33)	Port autonome de Bordeaux	mise en place	Marché	1375	4	7300	406867	241484	2002 juil	469,5	607051	360297	441	49	Renforcement du corps de l'ouvrage avec 1000 m3 de béton pour brèche = 215844€HT soit 215,84 € octobre 2014/m3. Blocométrie : 4 à 6 t	0,59

Carte de localisation des opérations sur les butées



Source : tableaux en annexes

Réalisé par : Cerema Eau mer et fleuves

Butée de bas de plage (Construction)

Enrochements

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Masse enrochements (t)	Coût HT (€)	Coût enrochements HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût HT (€ octobre 14)	Coût enrochements HT (€ octobre 14)	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Coût massique enrochements HT (€ octobre 14/t)	Observation
	Valras/Vendres (34)	SIVOM	réalisation	Marché	300	2,8	15030	698621	n.c	2006 oct	565,5	700,5	865401	n.c	2885	58	Blocométrie : 2 à 4 t

Géotextile et sable

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût octobre 14 HT	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Observation
	Valras/Vendres (34)	SIVOM	réalisation	Marché	300	2,4	397493	2006 oct	565,5	700,5	492385	1641	Étude Cete Méditerranée

Butée de pied de dune (Construction)

Géotextile et sable

Id	Lieu & Département	Maître ouvrage	Travaux	Source	L (m)	H (m)	Coût HT (€)	Année	Indice TP02	Indice TP02 octobre 14	Coût octobre 14 HT	Coût linéaire HT (€ octobre 14/m)	Observation
	Tréfiagat-Léchiagat (29)	Commune de Tréfiagat	Mise en place en pied de dune	Bulletin d'information de la commune	70	1m environ (hors ancrage)	81992	2010 octobre	660,8	700,5	86918	1242	Ouvrage détruit par la série de tempêtes de l'hiver 2013-2014
MA40 130(5)	CapBreton (40)	Capbreton	protection cordon dunaire de type stabiplage	Marché	250	1,2	327500	2007 août	565,5	700,5	392497	1570	Hauteur du boudin géotextile : 1,2m. Hauteur de l'ancrage : 2m
CAMoy/ml													
1 406 €													
CAMini/ml													
1 242 €													
CAMaxi/ml													
1 570 €													

© 2018 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires
Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre d'études et d'expertise, il a pour vocation de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au cœur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, organismes de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF).

impression : Jouve 01 44 76 54 40

Coordination-Maquettage : Service éditions Cerema Eau, mer et fleuves

Achevé d'imprimer : Juillet 2018

Dépôt légal : Juin 2018

ISBN : 978-2-37180-283-4

ISSN : 2417-9701

Prix : 77 euros

Illustration couverture ou crédits photos : Rehausse et confortement de la digue de Sébastopol
© Communauté de communes de l'île de Noirmoutier

Editions du Cerema

Cité des mobilités,
25 avenue François Mitterrand
CS 92803
69674 Bron Cedex

Cerema Eau, mer et fleuves Service Qualité Édition

134 rue de Beauvais
CS 60039
60280 Margny-lès-Compiègne

www.cerema.fr

La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

Coût des protections contre les aléas littoraux

Les phénomènes d'érosion et de submersion marine imposent de définir des stratégies de protection du littoral, déterminant ainsi sur le long terme des modes d'intervention sur les plages, les dunes, les digues et autres ouvrages de génie civil implantés sur nos côtes... Le présent guide expose les stratégies envisageables et apporte des éléments de méthode et des coûts unitaires pour évaluer sur la durée les dépenses d'investissement, d'entretien et de gestion associées à la protection contre les aléas littoraux.

Sur le même thème

International Levee Handbook, Ciria/Medde/Usace, 2013

Coût des protections contre les inondations fluviales, Cerema, 2014

Étude des systèmes de protection contre les submersions marines

Méthodologie et études de cas issues du retour d'expérience Xynthia, Cerema, 2016

Interventions d'urgence sur les dispositifs de protection contre les submersions marines, Cerema, 2018

Études hydrauliques maritimes - Guide à destination des maîtres d'ouvrage, Cerema, 2018

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Prix 77€

ISSN : 2417-9701

ISBN : 978-2-37180-283-4



Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - www.cerema.fr

Cerema Eau, mer et fleuves - 134, rue de Beauvais CS 60039 - 60280 Margny-lès-Compiègne - Tél. : +33 (0)3 44 92 60 00
Siège social : Cité des Mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. : +33 (0)4 72 14 30 30