



## Confortement d'un ouvrage de prévention des inondations et des submersions marines : l'exemple de la digue des Alliés à Dunkerque

Adrien CARTIER<sup>1</sup>, Antoine TRESCA<sup>2</sup>, Nicholas GRUNNET<sup>3</sup>,  
Bertrand MICHARD<sup>4</sup>, Nicola FORAIN<sup>5</sup>, Thomas VIAL<sup>6</sup>

1. GEODUNES, 10 rue bel air 59240 Malo les Bains, France. [cartier.geodunes@gmail.com](mailto:cartier.geodunes@gmail.com)
2. IDRA Environnement, Centre d'affaires CREANOR, 2 route de Bergues 59210 Coudekerque – Branche, France. [antoine.tresca@idra-environnement.com](mailto:antoine.tresca@idra-environnement.com)
3. DHI, 2/4 rue Edouard Nignon, 44372 Nantes, France. [ngr@dhigroup.com](mailto:ngr@dhigroup.com).
4. CEREMA / DTecEMF, Technopôle Brest-Iroise BP 5, 29280 Plouzané, France. [bertrand.michard@cerema.fr](mailto:bertrand.michard@cerema.fr)
5. Grand Port Maritime de Dunkerque, Terre-Plein Guillain, 59386 Dunkerque Cedex 1, France. [nforain@portdedunkerque.fr](mailto:nforain@portdedunkerque.fr)
6. DREAL Nord Pas-de-Calais, 44 rue de Tournai 59019 Lille Cedex, France. [thomas.vial@developpement-durable.gouv.fr](mailto:thomas.vial@developpement-durable.gouv.fr)

**Résumé :** La digue des Alliés, située entre la jetée Est du port de Dunkerque et le perré de Malo-les-Bains, sépare la mer du canal exutoire, unique lieu d'évacuation des eaux à la mer du système de canaux drainant la plaine flamande. L'ouvrage "clé" de prévention de classe B procure pour Dunkerque et ses communes limitrophes une protection contre les crues du territoire des Wateringues et les submersions marines. Compte tenu de l'intérêt stratégique de l'ouvrage, des ruines partielles suite aux événements de tempête de 1949 et 1953, des dégradations récentes et de la vulnérabilité des territoires protégés en arrière, l'État a missionné le Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD) pour mener à bien un projet de confortement de la digue des Alliés afin de disposer d'une meilleure protection vis-à-vis de l'exposition aux houles de tempête. Les études d'avant-projet ont permis de caractériser la morphodynamique du site et d'aboutir à la préconisation d'une solution souple de rechargement massif en sable (1500000 m<sup>3</sup>) en pied de digue afin de dissiper les houles susceptibles de venir endommager l'ouvrage. Cette solution s'intègre dans la stratégie actuelle de gestion durable du trait de côte (MEDDE, 2010 et 2011), et les campagnes de mesures topographiques montrent que l'érosion naturelle du site alimente la plage de Malo-les-Bains.

**Mots-clés :** Submersion marine, Confortement, Digue des Alliés, Morphodynamique, Rechargement de plage, Nord Pas-de-Calais, Trait de côte.

### 1. Introduction

Depuis la tempête Xynthia qui a frappé les côtes françaises en février 2010, l'État français a souhaité renforcer et accélérer la politique de prévention des risques de

## *Thème 4 – Ouvrages portuaires et offshore*

submersion marine afin de mettre en œuvre des mesures durables pour prévenir la défaillance des digues. Le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie a ainsi élaboré un Plan Submersion Rapide (PSR) présenté en février 2011 et a lancé un nouvel appel à projets relatifs aux Programmes d'Actions de Prévention des Inondations (PAPI, circulaire 2011), démarches visant à assurer la sécurité des personnes dans les zones exposées aux phénomènes brutaux de submersions rapides. Ces deux dispositifs contribuent à la mise en œuvre de la directive européenne relative à l'évaluation et à la gestion des risques d'inondation en favorisant l'émergence à la fois d'acteurs locaux forts et de stratégies locales de prévention des inondations.

En qualité de maître d'ouvrage du projet, la DREAL Nord Pas-de-Calais a missionné le Grand Port Maritime de Dunkerque (MOA délégué), lui-même assisté par le CEREMA (ex-CETMEF ; Assistance à Maitrise d'Ouvrage) pour mener à bien un projet de confortement de la digue des Alliés.

### **2. Contexte du projet**

La digue des Alliés, située à l'extrémité ouest du perré de Malo les Bains, constitue une portion de la rive droite du canal exutoire, unique lieu d'évacuation des eaux à la mer du système dunkerquois de drainage du polder au sein du Delta de l'Aa (figure 1). La digue des Alliés permet l'isolement des domaines maritime et continental via le canal exutoire, bief primaire d'évacuation des eaux à la mer. Ce système d'endiguement procure ainsi une protection contre les crues continentales du territoire du Delta de l'Aa et contre les submersions marines. Au titre de l'article L214-6 du Code de l'Environnement, la digue des Alliés est un ouvrage de classe B protégeant un territoire de plus de 40000 habitants.

Deux brèches ont déjà entaillé cette digue par le passé au cours des tempêtes dévastatrices de 1949 et 1953 provoquant l'inondation des bas quartiers de Dunkerque.

Bien que la cote d'arase de l'ouvrage (+12 m CM) garantisse une protection suffisante pour des aléas de submersion marine par débordement d'occurrence millénaire, la protection effective qu'il assure dépend de sa capacité structurelle à résister à des événements climatiques exceptionnels (figure 1). Dans le cadre de la mise en place de la réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques, le GPMD a entamé pour le compte de l'État un diagnostic de la digue des Alliés et de l'écluse Tixier. Les résultats ont dévoilé que la digue des Alliés présentait le plus de dégradations. En accord avec les services de l'État, le GPMD a entrepris des travaux de réparation et de confortement en deux temps. La première phase eût lieu en décembre 2011, avec le refoulement de 300000 m<sup>3</sup> de sable au droit de l'ouvrage rehaussant le niveau de la plage à la cote +5 m CM afin de constituer une couche d'usure en attendant la tranche principale des travaux.

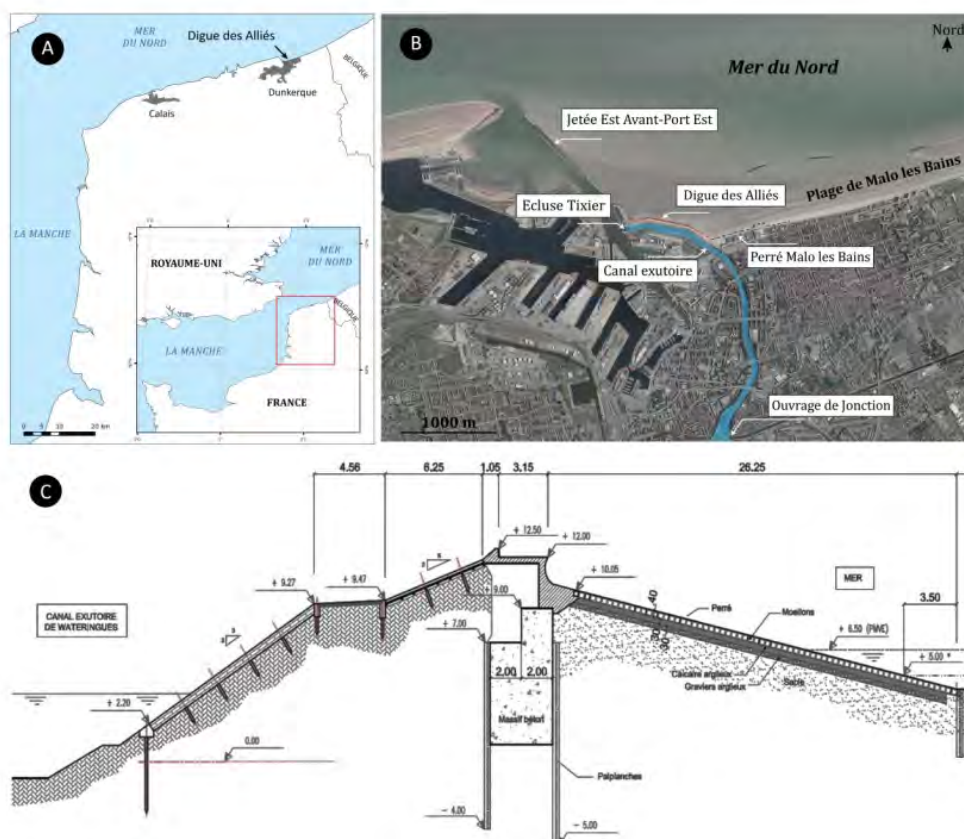


Figure 1. A) Localisation géographique de la digue des Alliés. B) Localisation des ouvrages. C) Coupe transversale type de la digue des Alliés (altimétrie en cote marine).

La seconde tranche consiste à un apport de 1200000 m<sup>3</sup> de sable et à la réparation structurelle de l'ouvrage. Le financement de ces travaux a mobilisé des crédits FEDER. La seconde tranche de travaux a également été labellisé Plan Submersion Rapide par la DREAL Nord Pas-de-Calais afin de bénéficier d'un financement par l'État.

### 3. Etudes d'avant-projet

En mai 2011, le groupement DHI-INGEROP a été retenu pour conduire les études avant-projet, comprenant la caractérisation morphodynamique du site à partir de modélisations numériques à tester sur différents plans masses : modélisations de l'évolution morphodynamique sur 10 ans de 5 scénarii.

#### 3.1 Fonctionnement morphodynamique générale du site

Les plages de la côte d'Opale sont caractérisées par un régime macrotidal, avec un marnage atteignant 6,05 m à Dunkerque lors de marées de vives eaux (SHOM, 2012). La conjonction des courants de houle, de marée et de ceux liés au déferlement des vagues à l'approche de la côte engendrent une dérive littorale dirigée vers l'Est (AUGRIS *et al.*, 1990; CARTIER, 2011).

## Thème 4 – Ouvrages portuaires et offshore

L'avant-port Est constitue un obstacle au transit sédimentaire venant de l'Ouest (TRESCA, 2013), de même que le chenal d'accès à l'avant-port qui induit un effet de barrière littorale. L'analyse des topo-bathymétries associées aux modélisations ont mis en évidence une érosion chronique de la plage et de l'avant-plage au droit de la digue des Alliés, ainsi qu'un gradient de la dérive littorale avec une augmentation de la capacité de transport vers l'Est (DHI, 2011). En raison des différences d'apport dus à la houle et la marée, le déficit sédimentaire moyen est estimé à  $10000 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$  (moyenne réalisée sur une période de 26 ans, 1985-2011) (figure 2).

Les études avant-projet ont abouti à la définition de trois plans masses visant à conforter l'ouvrage et le protéger des houles de tempête : (1) rechargement en sable de l'estran ; (2) rechargement associé à la création d'un banc subtidal ; (3) un rechargement associé à la construction de deux brise-lames. Le bureau d'étude DHI a utilisé une approche dite "hybride" afin de modéliser l'évolution morphodynamique du site sur une période de 10 ans. Cette approche hybride combine les modèles 2DH de morphodynamique côtière (couplage houle, courantologie, bathymétrie et transport sédimentaire) avec les modèles "one-line" d'évolution du trait de côte (GRUNNET *et al.*, 2012).

La modélisation d'un rechargement parallèle à la digue des Alliés avec une pente de 1/70 a clairement identifié l'action positive de cette solution. L'évolution à 10 ans montre une forte érosion à l'ouest associée à une accrétion à l'est consistant en un rééquilibrage rapide et un réalignement avec les contours bathymétriques de la plage de Malo-les-Bains (figure 3). Il apparaît que l'érosion naturelle de la partie Ouest du site, au niveau du tronçon en érosion est de l'ordre de  $45000 \text{ m}^3 \text{ an}^{-1}$  augmentant naturellement l'alimentation en sable vers la plage de Malo-les-Bains.

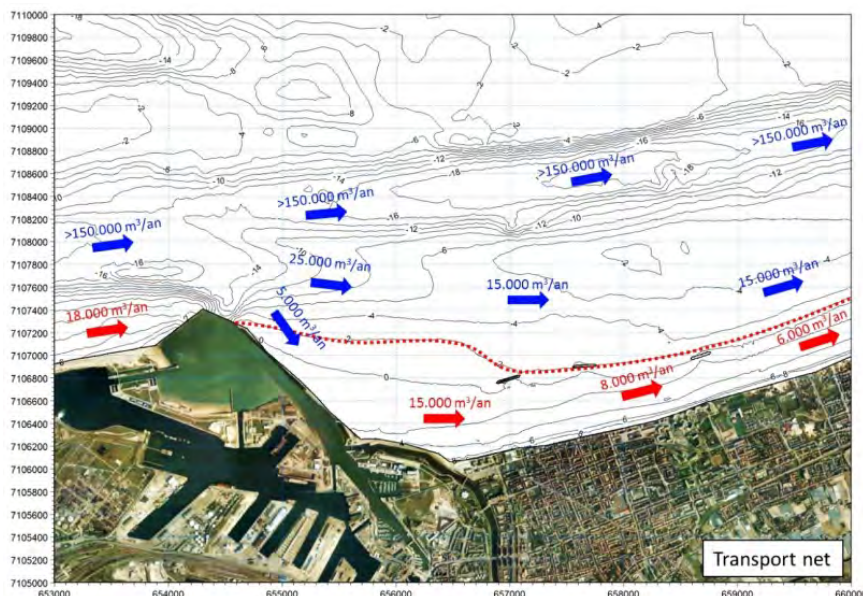


Figure 2. Synthèse du transport sédimentaire : transport net induit par les courants de houle (en rouge) et courants de marée (en bleu). (GRUNNET *et al.*, 2012).

Les volumes d'entretien ont donc été estimés à 225000 m<sup>3</sup> tous les 5 ans pour maintenir le niveau de protection de la plage.

Une analyse multicritères prenant en compte les aspects d'évolution morphologique, d'intégration paysagère, d'entretien et de coût, ont permis d'orienter définitivement le choix vers la solution 1 (rechargement de l'estran).

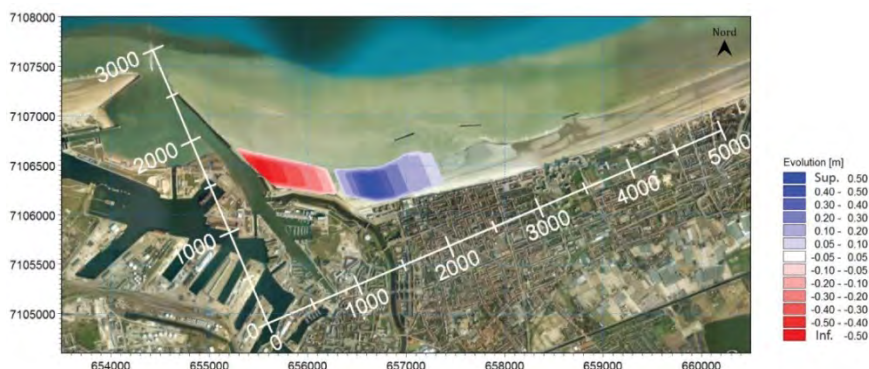


Figure 3. Simulation de l'évolution topo-bathymétrique à 10 ans dans le cadre d'un rechargement en sable de l'estran.

### 3.2 Dimensionnement du rechargement

Le maître d'ouvrage a choisi que le rechargement soit dimensionné pour un événement d'occurrence annuelle de 1/50 et prenant en compte une augmentation du niveau marin de 60 cm d'ici à 2100. L'analyse des hauteurs de houle et des niveaux marins extrêmes ont montré qu'un événement d'occurrence 1/50 engendrerait des niveaux d'eau compris entre +6,97 m CM et +7,93 m CM pour des hauteurs de houle respectivement de 3,06 m et 2,08 m (DHI, 2011). Le dispositif de protection de la digue doit permettre d'obtenir une agitation résiduelle, après propagation des conditions extrêmes, conservant l'intégrité de l'ouvrage ainsi qu'une surépaisseur de la plage adaptée aux conditions d'entretien du site. Le différentiel de l'état initial de la plage (juin 2011) avec la bathymétrie construite à partir d'un profil rechargé dont le haut estran est à la cote +7,5 m CM sur une largeur de 30 m résulte en un rechargement de l'ordre de 1500000 m<sup>3</sup> (figure 4). L'étude de dimensionnement conclut qu'une tempête cinquantennale a un impact très réduit sur la stabilité du ré-ensablement et que la dérive littorale est le forçage principal responsable de l'érosion.

### 3.3 Etudes environnementales

Différentes études environnementales ont été menées dans le cadre de la réalisation du dossier d'autorisation de travaux, notamment une étude des incidences sur les habitats et espèces d'intérêt communautaire. En effet, la plage située au droit de la digue des Alliés est située au sein d'une zone Natura 2000 mer (Bancs de Flandres). De ce fait, les travaux seront réalisés en hiver, afin de respecter la sensibilité naturelle de la zone.

Les études de compatibilité granulométrique ont permis d'identifier une source de sable pour le rechargement à l'entrée de l'avant-port Est, ce qui permet à la fois d'utiliser des sédiments originaires de la même unité hydrosédimentaire.

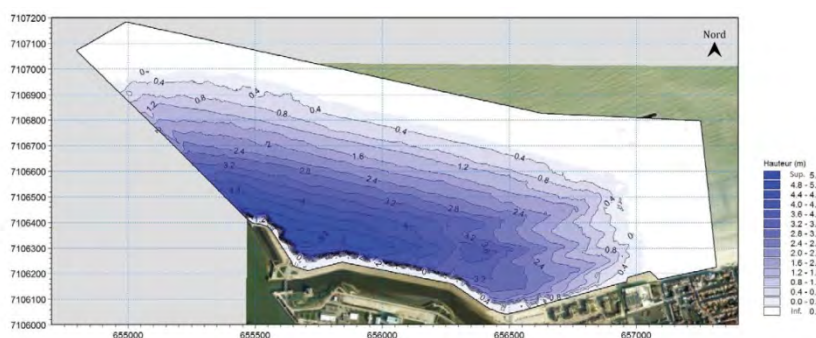


Figure 4. Différentiel altimétrique entre l'état initial de la plage en Juin 2011 et après le rechargement prévu en 2014. (DHI, 2011).

### 4. Résultats de la première tranche de travaux

Un premier retour d'expérience est disponible suite au suivi de la morphologie de la plage réalisé lors de la première tranche de travaux. Le suivi topo-bathymétrique réalisé en janvier 2012 suite à la première phase de travaux (rechargement de 250000 m<sup>3</sup> précisément) a montré une forte érosion (-2,5 m) à la jonction entre la digue des Alliés et la jetée Est de l'avant-port Est, associée à un engraissement significatif de l'estran à l'Est, correspondant à une hausse du niveau altitudinal de l'ordre de +1 m (GEODUNES, 2012) (figure 5). La formation d'un système de barres et de bêche a été également observée au niveau de la zone intertidale, témoignant d'une réorganisation d'un stock sédimentaire stable à moyen terme (STEPANIAN ET LEVOY, 2003). Entre janvier 2012 et décembre 2013, environ 42000 m<sup>3</sup> de matériaux ont été évacués du système, ce qui correspond à un déficit sédimentaire d'environ 21000 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>. Cette forte érosion correspond non seulement au réajustement qui se produit habituellement suite aux opérations de rechargement de plage, mais est également due à la tempête Xaver qui a frappé le Nord de l'Europe début décembre 2013. Le niveau d'eau a atteint +7,44 m CM, correspondant à une tempête centennale et lors de laquelle 11000 m<sup>3</sup> de sédiments ont été exportés hors du site. En effet, de janvier 2012 à octobre 2013 (avant la tempête), le bilan sédimentaire montrait un déficit de l'ordre de 31000 m<sup>3</sup> soit 17000 m<sup>3</sup> an<sup>-1</sup>. Le bilan reste positif puisque de juin 2011 (avant travaux) à décembre 2013, la zone du rechargement est toujours excédentaire d'environ 208000 m<sup>3</sup>. Si le sable s'est effectivement déplacé vers l'est à la faveur de la houle dominante et de l'asymétrie des courants de marée, alimentant de manière significative l'estran au droit du perré de Malo-les-Bains (figure 5), l'avant-plage n'a pas montré d'importants changements (GEODUNES, 2012).

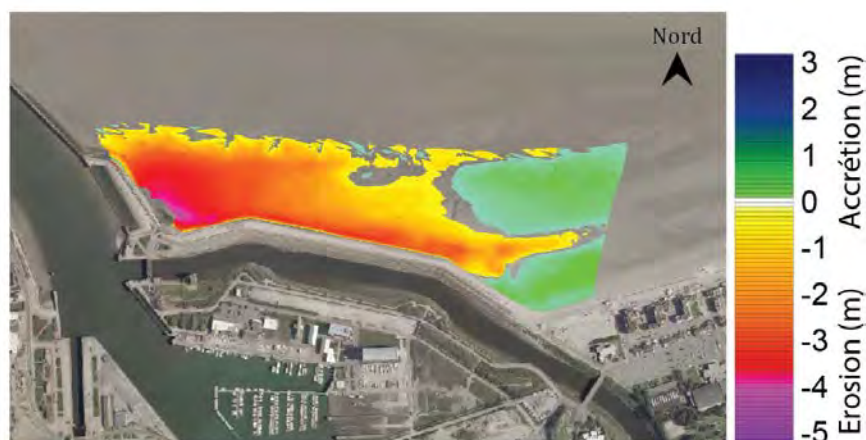


Figure 5. Différentiel altimétrique entre janvier 2012 et décembre 2013 pour la zone d'emprise correspondant au rechargement.

## 5. Mesures d'accompagnement

Des mesures d'accompagnement ont été prévues par le GPMD afin de maîtriser au maximum les envols de sable qui seront provoqués par le rechargement de plage (IDRA, 2013). En effet, l'apport artificiel de sable sera accompagné de la mise en place d'un haut de plage sec et par conséquent d'une prise en charge des sédiments par le vent. Les mesures de gestion du transport éolien par la mise en place de géotextiles brise-vent permettront de prévenir les problèmes liés à l'envahissement du sable au niveau des espaces urbanisés du front de mer au niveau du perré de Malo-les-Bains et surtout de conserver le stock de sable sur la plage. Les observations de terrain montrent en outre que le mur chasse-mer de la digue peut rapidement être comblé par le sable, ce qui favorise l'exportation du sable par le vent vers l'arrière de la digue (TRESKA, 2013), avec un dépôt du sable dans le canal exutoire (figure 6). Dans le cadre de la gestion, le mur chasse-mer sera d'ailleurs entretenu pour conserver son rôle de réservoir tampon.

## 6. Conclusion

Le dimensionnement du rechargement de plage en pied de digue répond aux objectifs de protection autant en termes de réduction d'agitation sur l'ouvrage lui-même qu'en termes de création d'une zone tampon pour permettre une érosion de l'estran lors d'une tempête cinquantennale sans compromettre l'intégrité de l'ouvrage. Ces aménagements ont un intérêt autant local, que régional ou national puisqu'il s'agit à ce jour du 1<sup>er</sup> rechargement en France de cette ampleur. Le confortement de la digue des Alliés peut faire référence au niveau national comme une démarche d'étude rigoureuse et partagée et une technique souple à préconiser pour une gestion durable du trait de côte.

## Thème 4 – Ouvrages portuaires et offshore



Figure 6. Photographies illustrant les dépôts éoliens de part et d'autre de l'ouvrage.

### 7. Références

- AUGRIS C., CLABAUT P., VICAIRE O. (1990). *Le domaine marin du Nord-Pas de Calais: Nature, morphologie et mobilité des fonds*. Rapport Ifremer, Région Nord-Pas de Calais., 85 p.
- CARTIER A. (2011). *Evaluation des flux sédimentaires sur le littoral du Nord Pas-de-Calais: Vers une meilleure compréhension de la morphodynamique des plages macrotidales*. Académie de Lille, 407 p.
- DHI (2011). *Etudes hydrauliques et de conception d'un dispositif de confortement de la digue des Alliés*. Rapport, 469 p.
- GEODUNES (2012). *Rechargement partiel de la digue des Alliés – Bilan de l'évolution morphodynamique entre Janvier 2012 et Décembre 2012*. Rapport, 39 p.
- GRUNNET N., ESBJØRN KRISTENSEN S., DRØNEN N., DEIGAARD R., TESSIER C., FORAIN N. (2012). *Evaluation of a nourishment schemes based on long-term morphological modelling*. International Conference on Coastal Engineering, Hue, Espagne, 11 p.
- IDRA ENVIRONNEMENT (2013). *Etude de mise en œuvre de filets brise-vent le long de la digue des Alliés*. Rapport, 47 p.
- MEDDE, DGPR (2011). *Circulaire du 12 mai 2011 relative à la labellisation et au suivi des projets PAPI 2011 et opérations de restauration des endiguements "PSR"*.
- MEDDE (2010). *La gestion du trait de côte*, col. Savoir-faire, édition Quae, 290 p.
- STEPANIAN A., LEVOY F. (2003). *Séquences d'évolution morphodynamique des barres intertidales d'une plage macrotidale : l'exemple d'Omaha beach (Normandie, France) Morphodynamical evolution sequences of intertidal bars on a macrotidal beach: case study of Omaha beach (Normandy, France)*. *Oceanologica Acta*, pp 167-177. [http://dx.doi.org/10.1016/S0399-1784\(02\)00004-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0399-1784(02)00004-X)
- SHOM (2012). *Référentiel altimétrique maritime*. Edition 2012, 98 p.
- TRESCA A. (2013). *Apports de l'étude du transport éolien dans la gestion d'un littoral artificiel : l'exemple de la façade maritime du Grand Port Maritime de Dunkerque, Nord de la France*. Académie de Lille, 398 p.