

La réhabilitation de la digue Carnot à Boulogne-Sur-Mer : Les particularités des travaux de confortement d'une digue en mer

The rehabilitation of the Carnot dike in Boulogne-Sur-Mer: The particularities of the reinforcement works of a dike at sea

A. Raillard¹

¹ BRL Ingénierie, Nîmes, alexis.raillard@brl.fr

Résumé

La digue Carnot est un ouvrage de trois kilomètres de longueur, qui protège la rade de Boulogne-sur-Mer des houles dominantes. Cet ouvrage est primordial à la sauvegarde des quais et terre-pleins du port et de secteurs d'habitations de la ville, pour limiter l'agitation portuaire, mais également vis-à-vis des problématiques de submersions marines et de franchissement.

La digue est un ouvrage de type « digue mixte » constituée d'enrochements, de maçonnerie et de béton. Il a été réalisé en plusieurs phases étalées sur une période de 80 ans. Dans le cadre des études de diagnostic, les désordres suivants ont été mis en évidence :

- un défaut généralisé de butée de pied de la carapace, favorisant les descentes de blocs en partie courante et fragilisant les couches filtres et la risberme extérieure ;
- une fissuration de la maçonnerie de la muraille, caractéristique de tassements différentiels ;
- des zones de décompactions ;
- des désordres classiques des parties en béton et en maçonneries ;
- des dégradations, voire l'arrachement de tronçons de murs chasse-mer sous l'assaut des vagues.

Les études d'avant-projet ont été menées suivant trois configurations pour des montants de travaux estimés entre environ 10 et 100 M€HT :

- Travaux de gros entretien : remise en état de l'ouvrage conformément à son état initial ;
- Travaux court terme : confortement de la digue pour répondre au critère de durée de vie de 50 ans ;
- Travaux long terme : travaux complémentaires pour porter la durée de vie de l'ouvrage à 100 ans.

Les travaux de Gros Entretien ont débuté en 2017 pour une durée de deux ans. Ces travaux ont nécessité l'emploi d'importants moyens nautiques et la prise en compte des contraintes des marées, notamment pour le rechargement de la carapace avec des blocs artificiels de 50 tonnes, la réalisation de géoblocs sur les risbermes et les travaux de réhabilitation de la muraille maçonnée.

Mots-Clés

Digue ; maritime ; confortement ; travaux ; marée.

Abstract

The Carnot breakwater is a three-kilometre-long structure that protects the Boulogne-Sur-Mer harbour from the dominant swells.

This structure is essential to the safeguarding of the docks and harbour infrastructures and of residential areas of the city, to limit port agitation, but also with regard to the problems of marine submersions and overtopping.

The Carnot breakwater is a mixed structure made of rockfill, masonry and concrete. It was built in several phases over a period of 80 years, and which is highly exposed to storming sea packs.

The design studies were then carried out according to three configurations, for works estimated between approximately 10 and 100 M€HT:

- Maintenance works : restoration of the structure to its original state ;
- Short-term works : reinforcement of the dike to meet the 50-year lifespan criterion ;
- Long-term works : additional works to be undertaken to extend the life of the structure to 100 years,

Heavy maintenance works began in 2017 for a two-years period.

These works required to use of substantial nautical means and to take into account of the tides, in particular for the reloading of the primary cover layer with artificial blocks of 50 tons, the realization of geoblocks on the berms and the reinforcement of the masonry wall.

Key Words

Breakwater; shore protection; reinforcement; works; tide

La réhabilitation de la digue Carnot à Boulogne-Sur-Mer : Les particularités des travaux de confortement d'une digue en mer

Les intervenants

La Région Nord Pas de Calais a missionné le groupement BRL Ingénierie / Valétudes pour réaliser la maîtrise d'œuvre complète ainsi que l'établissement des dossiers réglementaires relatifs à la réhabilitation de la digue Carnot au port de Boulogne-Sur-Mer. Les études de conception ont débuté en 2014 par la réalisation du diagnostic de l'ouvrage. L'appel d'offres pour la réalisation des travaux de gros entretien a été lancé en 2016, et c'est le groupement d'entreprise Eiffage Génie Civil / Herbosch Kiere qui a été retenu pour un démarrage des travaux en 2017 et pour une durée de 2 ans.

L'ouvrage à réhabiliter

Cet ouvrage d'environ trois kilomètres de longueur est primordial pour la sauvegarde des quais et terre-pleins du port, des habitations du Boulevard Sainte-Beuve et du centre national de la mer (Nausicaa) qui sans cette protection subiraient les assauts des houles de secteur Ouest. La digue se compose :

- D'une « branche de terre » s'étendant de l'enracinement jusqu'au PM 1500 environ et qui correspond à la partie de digue derrière laquelle il y a directement un terre-plein à protéger,
- D'une « branche de mer », s'étendant du PM1500 (au niveau du coude) jusqu'à son musoir.

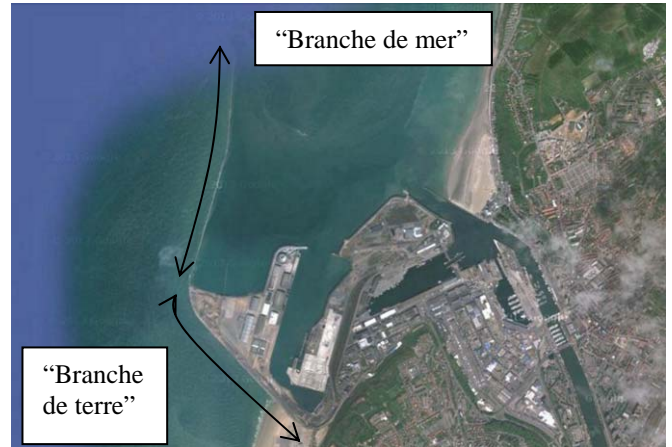


FIGURE 1 : LOCALISATION DE L'OUVRAGE (SOURCE : GOOGLE EARTH)

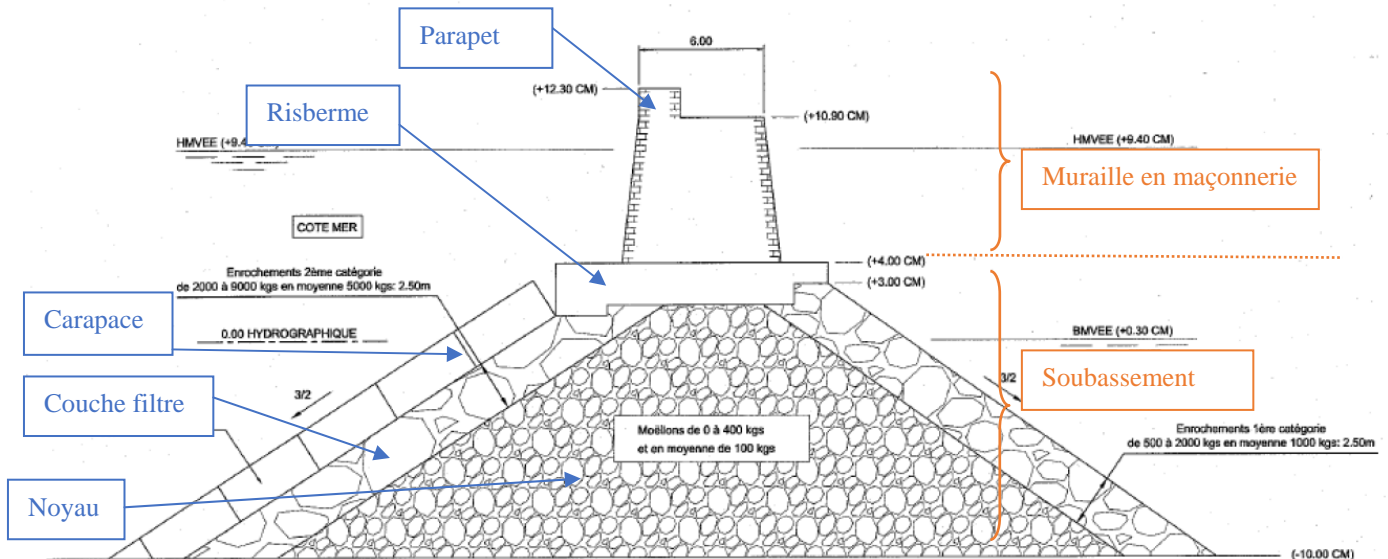


FIGURE 2 : COUPE TYPE THEORIQUE DE LA DIGUE ET DESIGNATION DES DIFFERENTES PARTIES D'OUVRAGES

Dans sa partie courante (hors musoir), la digue Carnot est une digue mixte constituée d'un soubassement en enrochements, surmonté d'une muraille en maçonnerie recevant elle-même un parapet et/ou un mur chasse mer. Le musoir est constitué de caissons.

Le soubassement de la digue est constitué d'un noyau en enrochements, protégé par des enrochements naturels et recevant en tête une risberme en maçonnerie sur laquelle est fondée la muraille. Côté exposé, une carapace en blocs béton parallélépipédiques a été mise en œuvre.

La muraille en maçonnerie constitue la superstructure de la digue. La plate-forme supérieure est surmontée, du côté du large, par un parapet également en maçonnerie.

Le soubassement de la digue est constitué d'un noyau en enrochements, protégé par des enrochements naturels et recevant en tête une risberme en maçonnerie sur laquelle est fondée la muraille. Côté exposé, une carapace en blocs béton parallélépipédiques a été mise en œuvre.

La muraille en maçonnerie constitue la superstructure de la digue. La plate-forme supérieure, est surmontée, du côté du large, par un parapet également en maçonnerie.

Les désordres rencontrés et l'état général de l'ouvrage

Différentes investigations ont été menées sur la digue Carnot dans le cadre des études de diagnostic et en particulier :

- Des sondages géotechniques et des mesures géophysiques pour caractériser les couches de sols support, évaluer l'homogénéité de la maçonnerie et détecter d'éventuelles zones de décompactions du corps de digue ;
- Des inspections visuelles détaillées des parties aériennes,
- Une analyse approfondie des parties immergées et notamment de la carapace au moyen d'un levé multifaisceaux très haute résolution (levé 3D de la digue).

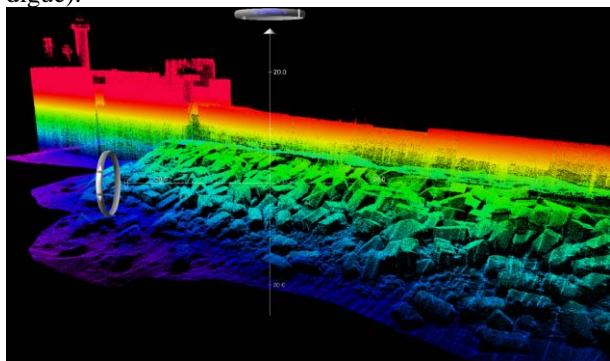


FIGURE 3 : LEVE TOPO-BATHY 3D DE L'OUVRAGE – VUE COTE LARGE AU NIVEAU DU MUSOIR (SOURCE : MESURIS)

L'analyse croisée de ces investigations approfondies a permis d'identifier et de localiser les désordres rencontrés. L'état général de l'ouvrage est ainsi qualifié de moyen à mauvais.

La carapace côté large de la digue est jugée en mauvais état, avec notamment les précisions suivantes :

- Un défaut de butée de pied présent sur quasiment tout le linéaire de la digue : ce désordre, combiné avec l'action de la houle, fragilise la carapace et conduit à des descentes de blocs parallélépipédiques ; ces mouvements de blocs laissent le talus sans protection sur plusieurs parties d'ouvrage ; la couche filtre en enrochements en partie courante est visible sur de nombreuses zones et la crête de talus n'est plus protégée, permettant une dégradation de la risberme extérieure sous l'action répétée de la mer (érosion, affouillements, cavités).
- Des défauts de la carapace en blocs béton en section courante (désorganisation, absence ou manque de blocs) qui concernent environ 20 % de cette partie d'ouvrage, avec des désordres accentués sur les 200 mètres à proximité du musoir.
- Des défauts de carapace en crête de talus ne permettant plus de protéger le pied de la risberme extérieure. Ces désordres concernent environ 30 % de cette partie d'ouvrage et sont plus accentués sur la « branche de mer » de la digue, qui est la partie la plus exposée (les 1 500 derniers mètres où il n'y a pas de terre-plein adossé en arrière).

La muraille en maçonnerie présente un état moyen. Bien que cette partie d'ouvrage fasse l'objet de travaux d'entretien assez réguliers, il a notamment été constaté :

- Des fissures plus ou moins inclinées réparties sur le linéaire de la digue, de l'ordre d'une quinzaine sur chaque parement de muraille (côté large et côté rade). Ces fissures sont caractéristiques de tassements différentiels, a priori stabilisés à ce jour.
- Des dégradations classiques d'ouvrages maçonnés soumis à l'action mécanique et physico-chimique de la mer (déjoints, abrasion et manque de moellons). Ces désordres sont plus accentués sur les 300 derniers mètres de la muraille, côté large mais aussi côté rade.
- Des zones de décompaction, voire de vides possibles de la maçonnerie de remplissage de la muraille. Ces désordres détectés par les reconnaissances géophysiques, et ont pu être rapprochés avec le relevé des fissures.

Le parapet est dans un état général moyen à mauvais avec les précisions suffisantes :

- Sur les parties maçonnées, le parapet est jugé en mauvais état, avec notamment des zones dégradées avec arrachement de moellons sous l'action des paquets de mer, en particulier en extrémité de digue.

- Sur les parties réparées en béton armé, le parapet présente un état moyen et les principaux désordres sont liés à la dégradation classique du béton armé par la corrosion en environnement marin. À noter également que le mur chasse mer en béton armé, localisé sur la branche de « terre », présente un arrachement généralisé de la partie supérieure dans la partie courbe de la digue, particulièrement exposé aux assauts de la mer.

Les études de conception

Les études de conception ont été menées suivant trois horizons temporels :

- Horizon « immédiat », pour lequel les travaux devront permettre une remise en état de l'ouvrage à l'identique de sa configuration initiale ;
- Horizon « court terme » pour lequel la durée de vie minimale des infrastructures est fixée à 50 ans, celle-ci pouvant être facilement prolongée moyennant des opérations régulières de surveillance et d'entretien ;
- Horizon « long terme » (2100) pour lequel la durée de vie des infrastructures est fixée à 100 ans.

États de mer et niveaux d'eau

La principale action appliquée à ce type d'ouvrage est un état de mer, caractérisé par un couple (Niveau d'eau ; Hauteur de houle). Cette action est un événement conjoint qui se définit pour une période de retour déterminée. À Boulogne-Sur-Mer, il a été retenu un facteur de corrélation correspondant à des niveaux d'eau et états de mer faiblement corrélés, valeur recommandée et représentative de la Manche.

Classiquement une digue à la mer est dimensionnée pour résister sans dommages majeurs à un événement centennal. C'est la période de retour qui a été retenue pour dimensionner les travaux pour l'horizon « court terme ».

La probabilité qu'un événement centennal se produise sur une durée de vie de 50 ans est de 39 %.

Par analogie et en reprenant la même probabilité d'occurrence d'un événement sur une durée de vie de 100 ans, il a été retenu une période de retour de 200 ans pour définir les travaux à engager à l'horizon « Long terme ».

Pour les travaux de gros entretien, consistant à réparer à l'identique de l'existant comme cela est réalisé depuis toujours, il n'a pas été mené de calculs de dimensionnements. Seuls les travaux de réparation proposés pour les horizons « court terme » et « long terme » ont fait l'objet de calculs, avec des critères de dimensionnement portant sur le taux de dommage acceptable par la carapace et sur les débits de franchissements admissibles en arrière de l'ouvrage.

Les critères de taux de dommage et de débits de franchissement admissibles sont identiques pour les deux horizons (court terme et long terme). Ce sont les actions sollicitantes qui sont différentes (événement centennal pour

l'horizon court terme et événement bicentennal pour l'horizon long terme »).

Conformément aux règles de l'art usuelles, le pourcentage de dommage admissible a été fixé à 5 % pour la carapace de l'ouvrage, et à 10 % pour la butée de pied.

Les débits de franchissements admissibles ont quant à eux été fixés à :

- 10 L/s/ml pour la branche de « terre », correspondant au débit maximal admissible pour des piétons.
- 200 L/s/ml pour la branche de « mer », correspondant au débit au-delà duquel des dégâts seront générés sur l'ouvrage.

Deux couples extrêmes, de période de retour identique, ont été utilisés pour le dimensionnement : une houle forte avec un faible niveau d'eau ainsi qu'une houle faible avec un fort niveau d'eau.

Le niveau d'eau total est quant à lui calculé à partir de deux contributions : niveau d'eau « extrême » et élévation du niveau de la mer dû au changement climatique.

Sur cette base, les couples suivants ont été retenus :

- « court terme » - période de retour conjointe 100 ans :
 - (houle T = 100 ans ; niveau d'eau T = 0,02 ans + élévation de la mer à l'horizon 2064)
 - (houle T = 1 an ; niveau d'eau T = 2,8 ans + élévation de la mer à l'horizon 2064)
- « long terme » - période de retour conjointe 200 ans :
 - (houle T = 200 ans ; niveau d'eau T = 0,02 ans + élévation de la mer à l'horizon 2100)
 - (houle T = 1 an ; niveau d'eau T = 5,7 ans + élévation de la mer à l'horizon 2100)

Les hauteurs de houles incidentes sont variables en pied d'ouvrage pour une même période de retour ; aussi plusieurs coupes de calculs ont été réalisées pour en tenir compte, en se basant sur l'étude de propagation réalisée par BRLi.

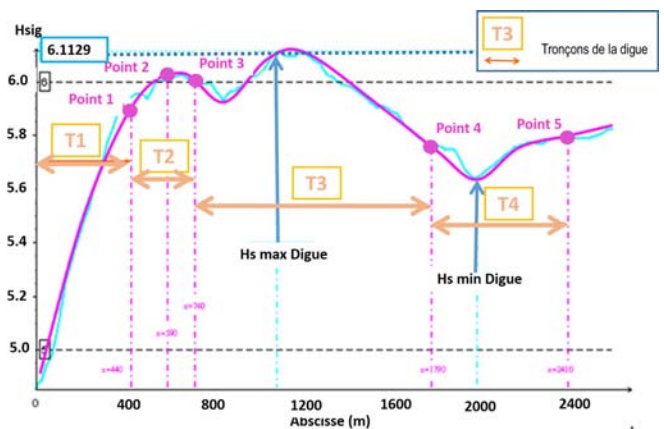


FIGURE 4 : ÉVOLUTION GÉNÉRALE DES HS LE LONG DE LA DIGUE CARNOT - SCENARIO 3 (SOURCE : BRLi)

Le tableau ci après récapitule les différents scénarios étudiés pour les études d'avant-projet « court terme » et « long terme ».

AVP	Période de retour événement conjoint (an)	Houle du large		Niveau d'eau			
		période de retour (an)	hauteur significative (m)	période de retour (an)	niveau d'eau (m)	élévation dû au changement climatique (cm)	niveau d'eau total (m)
court terme	100	100	6.45	0.02	9.37	37	9.74
		1	4.10	2.8	9.78	37	10.15
long terme	200	200	6.72	0.02	9.37	73	10.10
		1	4.10	5.7	9.85	73	10.58

FIGURE 5 : RECAPITULATIFS DES SCENARIIS ETUDIÉS – NIVEAUX D'EAU EN COTES MARINES - (SOURCE : BRLI)

Les travaux de gros entretien

Cette classe de travaux correspond à des réparations à mettre en œuvre sur la digue Carnot à très court terme pour une remise en état de l'ouvrage conformément à son état initial. Cela correspond essentiellement à des travaux de réparation des parties d'ouvrages dégradées, tels qu'ils ont pu être réalisés jusqu'à présent, et n'ont à ce titre pas fait l'objet de dimensionnements :

- Plateforme supérieure de la digue
 - Reconstruction à l'identique de la partie supérieure des murs chasse mers (dégradée ou absente),
 - Reconstruction à l'identique du parapet pour les parties dégradées ou arrachées,
 - Reconstitution du dallage de la promenade sur les parties dégradées,
 - Réparation du béton armé dégradé du parapet, des murs chasse-mer, de la muraille.
- Muraille
 - Réparation de la maçonnerie dégradée (rejointoiment),
 - Traitement des fissures de la maçonnerie,
 - Risbermes,
 - Protection du pied des risbermes / crêtes du talus sur les parties où les blocs ont glissé,
 - Réparation de la partie supérieure de la risberme (côté large) sur les parties dégradées.
- Carapace
 - Rechargements localisés de la carapace sur les zones présentant des manques, à l'identique de l'existant (enrochements à l'enracinement, blocs parallélépipédiques de 33 tonnes et de 50 tonnes).

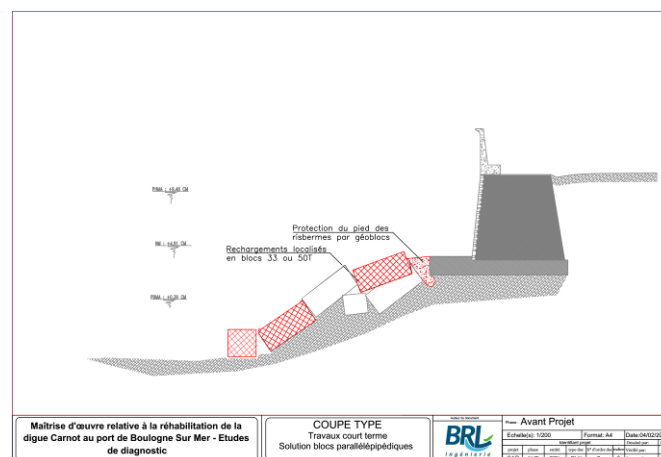


FIGURE 6 : COUPE DE PRINCIPE DES TRAVAUX DE GROS ENTRETIEN - SOURCE : BRL INGENIERIE

Le montant de ces travaux est évalué à 10 millions d'euros hors taxe environ.

Les travaux Court Terme

Cette classe de travaux correspond à une réhabilitation de l'ouvrage comprenant un confortement de la digue pour répondre au critère de durée de vie de 50 ans. Par ailleurs ces travaux doivent être compatibles avec les travaux Long Terme, à savoir que les travaux Long Terme consisteront à réaliser des travaux complémentaires aux travaux court terme pour prolonger la durée de vie de l'ouvrage réhabilité à 100 ans.

Ces travaux comprennent :

- Les travaux d'entretien précédemment listés (hors carapace) portant sur la plateforme supérieure de la digue, la muraille et les risbermes.
- Pour la carapace :
 - Réalisation d'une butée de pied avec risberme permettant de stabiliser la descente des blocs en pied de risberme.
 - Rechargements localisés de la carapace au-dessus de la risberme de la butée précédemment réalisée, sur les zones présentant des manques.

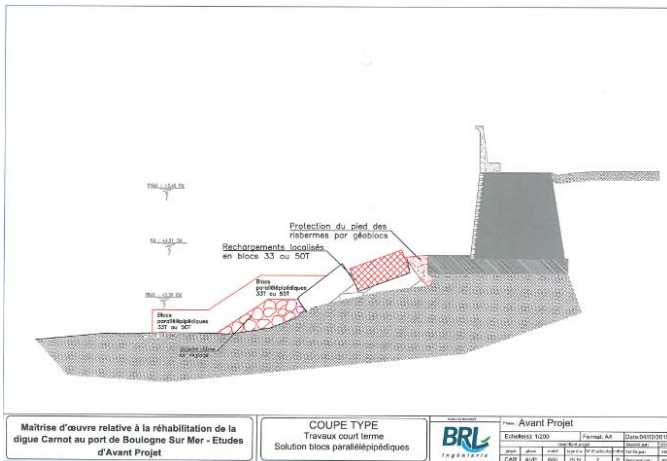


FIGURE 7 : COUPE DE PRINCIPE DES TRAVAUX COURT TERME - SOURCE : BRL INGENIERIE

Le montant de ces travaux est évalué entre 35 et 50 millions d'euros hors taxe environ, en fonction du type de blocs retenus pour la carapace (type Accropode™ ou parallélépipédiques).

Les Travaux Long Terme

Cette classe de travaux correspond aux travaux de réhabilitation complémentaires à engager pour porter la durée de vie de l'ouvrage à 100 ans et comprennent :

- Les travaux Court Terme précédemment listés,
- La rehausse d'une partie du mur chasse mer pour satisfaire aux critères de franchissement avec l'élévation du niveau de la mer,
- Rechargement complet de la carapace au-dessus de la risberme de la butée de pied.

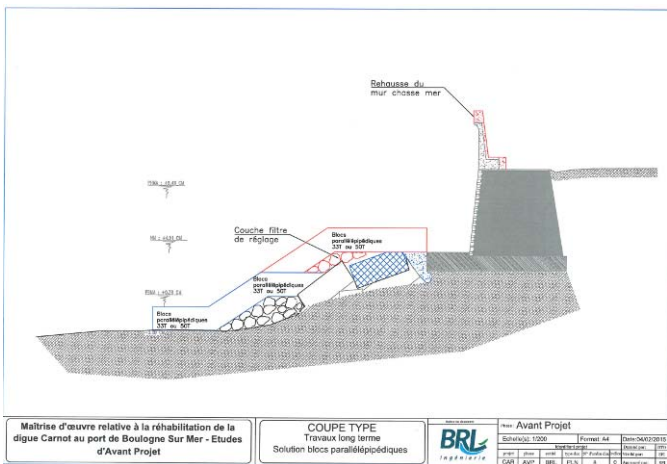


FIGURE 8 : COUPE DE PRINCIPE DES TRAVAUX LONG TERME - SOURCE : BRLINGENIERIE

Le montant de ces travaux est évalué entre 65 et 100 millions d'euros hors taxe environ, en fonction du type de blocs

retenus pour la carapace (type Accropode™ ou parallélépipédiques).

Les particularités des travaux maritimes

Les travaux de gros entretien ont débuté en 2017 pour une durée de deux ans et un coût de l'ordre de 10 millions d'euros HT.

Les principales contraintes de ces travaux sont les suivantes :

- La nécessité de disposer d'une aire d'installation de chantier conséquente, à proximité d'un quai de chargement pour permettre la préfabrication et le chargement des 585 blocs béton de la carapace de 50 et 33 tonnes.
- La mise en œuvre de moyens nautiques lourds, pour permettre le stockage des blocs qui seront posés à la journée et leur mise en place.
- La prise en compte de la marée :
 - Les blocs de carapace en partie courante étant posés à marée haute pour disposer d'un tirant d'eau suffisant pour la navigation du ponton automoteur à proximité de la digue ;
 - Les blocs de carapace de l'enracinement étant mis en œuvre à marée basse par engins terrestres, la profondeur d'eau étant insuffisante dans cette zone par rapport au tirant d'eau des moyens nautiques ;
 - Le confortement des risbermes au moyen de géoblocs ne pouvant être réalisé qu'à marée basse ;
 - Les travaux sur la muraille en maçonnerie étant réalisés à marée basse également, au moyen de cordistes.
- Les conditions météorologiques, en particulier le vent pour les travaux de levage avec grue et la houle pour l'utilisation des moyens nautiques.



FIGURE 9 : CONFORTEMENT DES RISBERMES A MAREE BASSE - SOURCE : VALETUDES



FIGURE 10 : RECHARGEMENT DE LA CARAPACE A L'ENRACINEMENT A MAREE BASSE - SOURCE : VALETUDES

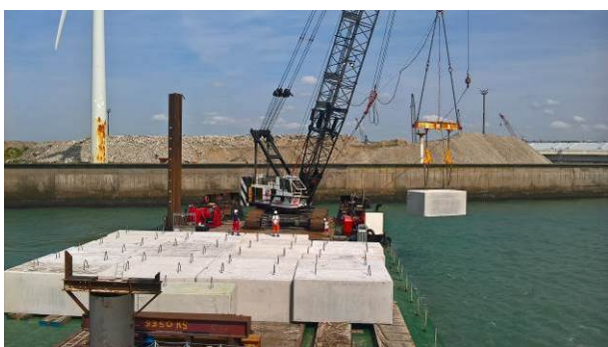


FIGURE 11 : RECHARGEMENT DE LA CARAPACE EN SECTION COURANTE A MAREE HAUTE - SOURCE : VALETUDES



FIGURE 12 : TRAVAUX DE REPARATIONS DE LA MURAILLE EN MAÇONNERIE AU MOYEN DE CORDISTES - MAREE BASSE - SOURCE : VALETUDES

Vis-à-vis des intempéries, il a été considéré qu'une hauteur significative de houle supérieure à 0,50 mètre ne permettait pas aux moyens nautiques de travailler dans de bonnes conditions (pour le positionnement des blocs au GPS en

particulier).

Une analyse statistique des houles au large de Boulogne-Sur-Mer sur une vingtaine d'année a permis de préciser que plus de la moitié du temps les conditions de mer étaient supérieures à ce critère.

Aussi, le marché travaux a été bâti en tenant compte de ces conditions pour les délais d'exécution, et en fixant un nombre de journées d'intempéries prévisibles supposées comprises dans ces délais. Au-delà, l'entreprise pourra prétendre à des délais supplémentaires et à une rémunération pour immobilisation des moyens nautiques.

Le nombre de journées d'intempéries prévisibles a été fixé à 50 % du temps en période estivale et à 70 % du temps en période hivernale.

Dans le cadre du chantier, un houlographe a été mis en place au droit de la digue afin de pouvoir établir les statistiques de houle et valider les journées d'intempéries.

Les travaux de rechargement de la carapace ont par ailleurs nécessité l'emploi de moyens nautiques lourds pour permettre le levage de blocs de 50 tonnes. Pour se faire un ponton autopropulsé de 80 mètres de longueur a été utilisé, permettant de recevoir une grue à flèche de 300 tonnes. Ce ponton est équipé d'un système de positionnement dynamique permettant la pose des blocs conformément aux plans d'exécution, la position théorique des blocs s'affichant à l'écran du grutier ainsi que la position en temps réelle du bloc en cours de manipulation. Ces moyens nautiques mobilisent un personnel marin vivant sur le navire et opérationnel 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7. Le chargement des blocs sur le ponton nécessite 3 à 4 heures, et la pose des blocs doit être réalisée à marée montante dans une fenêtre de travail de 4 à 5 heures.

Conclusion

Les études de conception relatives à la réhabilitation de la digue Carnot à Boulogne-Sur-Mer ont permis de définir les programmes de travaux pour les trois horizons temporels suivants :

- Horizon « immédiat », pour lequel les travaux devront permettre une remise en état de l'ouvrage à l'identique de sa configuration initiale ;
- Horizon « court terme » pour lequel la durée de vie minimale des infrastructures est fixée à 50 ans, celle-ci pouvant être facilement prolongée moyennant des opérations régulières de surveillance et d'entretien ;
- Horizon « long terme » (2100) pour lequel la durée de vie des infrastructures est fixée à 100 ans.

Ces trois programmes de travaux ont été bâtis pour être compatibles entre eux, c'est-à-dire que les travaux d'un horizon plus élevé consistent en des travaux complémentaires à l'horizon précédent.

À ce jour, ce sont les travaux de gros entretien, compatibles avec le budget de la maîtrise d'ouvrage, qui ont été lancés en 2017 sur une durée de 2 ans, pour un montant de l'ordre de 10 millions d'euros HT. Ces travaux de confortement consistent en des travaux classiques sur des ouvrages maritimes extérieurs mais illustrent bien les problématiques d'exécution liées aux conditions météorologiques et océaniques, sources d'aléas sur les délais d'exécution et les montants des travaux. Dans le cadre de ce marché de travaux, le choix a été fait de donner un délai d'exécution global sans restriction sur les saisons pour les interventions nautiques de l'entreprise, tenant compte d'un forfait conséquent sur le nombre de journées d'intempéries prévisibles (jusqu'à 70 % des jours ouvrés). Cela a permis d'offrir plus d'indépendance et de souplesse à l'entreprise dans la gestion et l'organisation des travaux nautiques, tout en sécurisant le maître d'ouvrage sur le respect des délais et sur le risque des immobilisations potentielles de chantier, impliquant des moyens nautiques lourds et donc coûteux.

Ces travaux ont permis la mise œuvre de :

- 585 blocs béton de 50 et 33 tonnes sur la carapace,
- 3 200 m³ de géoblocs coulés en place au pied de la risberme,
- 4 700 m² de rejointoiement de la muraille en maçonnerie,
- 300 ml de fissures injectées sur la muraille.
