



## **Digue de protection en caissons préfabriqués en béton armé**

**Noureddine ELALOUI<sup>1</sup>**

1. Société Tanger Med Engineering (TME), Zone franche Ksar Al majaz, Tanger Med, Maroc.  
*n.elaloui@tme.ma*

### **Résumé :**

Les digues -principale et secondaire- de protection du port Tanger Med II sont constituées de 105 caissons préfabriqués en béton armé.

La conception et la validation du projet de ces digues à caissons est conduite en plusieurs phases, en se basant sur des reconnaissances, essais au laboratoire, calculs sur modèles mathématiques, modèles réduits 3D, dans l'objectif de respecter les exigences de fonctionnalité, les critères de durabilité et les données et critères de dimensionnement des ouvrages.

Les caissons quadrilobés du projet ont les dimensions de 28 m×28 m×24,5 m. Ils sont préfabriqués en béton armé de haute performance, munis d'une protection cathodique pour une durée de vie de 100 ans. Plusieurs jeux de coffrage glissant sont mis en place pour réaliser de bonnes cadences tout en assurant une meilleure qualité. Le cycle de préfabrication est enchaîné sur trois étapes :

- 1<sup>ère</sup> levée : préfabrication à terre sur un fond de moule métallique, du radier et de 9,2m des voiles. Le caisson est décollé à l'aide d'injecteurs d'air comprimé situés au dessous du radier et déplacé soit par un transbordeur sur rails soit par un système de ripage sur platines à l'aide des vérins de 500 t à une station de maturation, il est ensuite équipé pour la mise à l'eau dans une darse aménagée pour cela.
- Mise à l'eau : le système de mise à l'eau est constitué d'un portique (travées métalliques mobiles sur platines montées sur une structure en béton armé poutres-poteaux-pieux-tirants) assurant la manutention du caisson de 3400 tonnes à l'aide des vérins de 500 t et des câbles précontraints accrochés aux ancrages incorporés au radier.
- 2<sup>ème</sup> levée : le caisson est amarré à l'un des trois quais de rehausse afin de réaliser la hauteur restante des voiles (11,5 m ou 14,5 m), en mettant en place au fur et à mesure les équipements de la protection cathodique.
- Pose et superstructures : une fois la rehausse terminée, le caisson est échoué à sa position finale, ballasté et ainsi le bétonnage de la dalle et des murets sont entamés.

### **Mots clés :**

Digue, caisson – Béton de haute performance – Transbordeur – Ripage – Vérins – Protection cathodique – Darse – Système de mise à l'eau – Quai de rehausse

## 1. Introduction

Le port Tanger Med 2 est l'extension côté ouest du port Tanger Med 1 mis en service partiellement courant l'année 2007. Il est situé à 40 km à l'Est de la ville de Tanger sur la rive sud de la mer méditerranéenne.

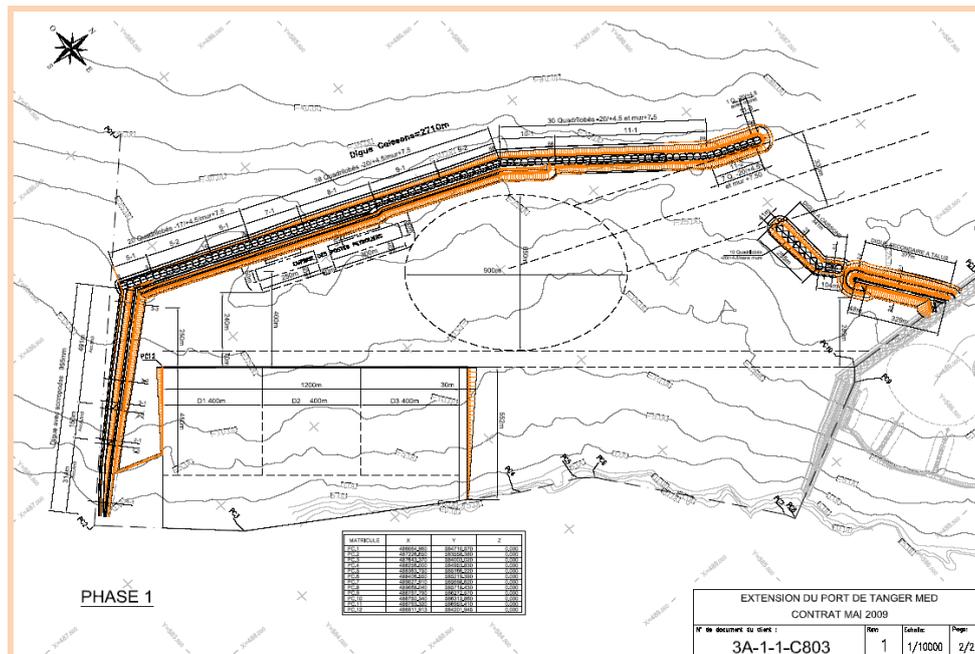


Figure 1. Plan de masse port Tanger Med 2 – phase 1

Le port disposera d'un terre-plein de 150 hectares, d'un quai à conteneurs de 2800 ml, d'une digue principale de 3875 ml (partie à caissons de 2920 ml et partie à talus 955 ml) et d'une digue secondaire de 1163 ml (partie à caissons de 210 ml et partie à talus 953 ml, voir figure 1). Le choix des caissons à partir de certaines profondeurs d'eau (-20 mZH) devient plus intéressant qu'une digue à talus, nécessitant des blocs préfabriqués de protection plus imposants ( $16 \text{ m}^3$ ) sans que la stabilité ne soit assurée, se traduisant par une consommation moindre des matériaux et par conséquent un faible impact environnemental. La digue assurera la protection du port contre les houles en limitant le débit de franchissement à  $1 \text{ l/m/s}$  pour des conditions de houle décennale associées à un niveau d'eau haut, et en respectant le taux d'indisponibilité qui est défini par le temps de dépassement de la hauteur incidente résiduelle limite (respectivement 1%, 2% et 3% du temps pour les hauteurs 0,7 m, 0,6 m et 0,5 m). La digue devra être conçue de manière à ce que les futurs équipements (conduites, équipements des postes pétroliers, ...) ne soient pas endommagés pour des conditions de houle centennales (la protection des équipements fait partie intégrante de la conception).

Les 105 caissons quadrilobés du projet sont dimensionnés selon le règlement BAEL, ils s'inscrivent dans un carré de 28 m et une hauteur de 21,5 m ou 24,5 m selon le type.

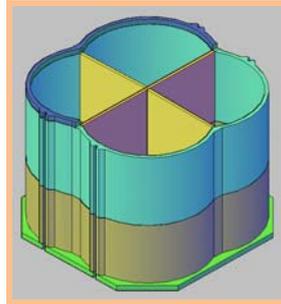


Figure 2. Géométrie 3D du caisson.

## 2. Préfabrication des caissons

### 2.1 Installations du chantier

Les installations du chantier sont établies sur une plateforme de 15 hectares gagnée sur mer pour une durée de 8 mois. La première contrainte est de concevoir une plateforme assez protégée contre les houles avec les profondeurs d'eau requises pour les quais de rehausse en utilisant moins de matériaux. Les différentes activités ont été lancées presque simultanément afin de respecter le délai : les digues d'enclôture et leurs protections en enrochements, le remblai hydraulique de la plateforme, le vibrocompactage de la zone de préfabrication des caissons, la réalisation des pieux en béton armé pour la fondation du système de mise à l'eau des caissons et la réalisation des trois fonds de moules de préfabrication et les six stations de maturation des caissons. Le béton d'une partie de ces ouvrages a été livré par une centrale installée à proximité du site, en attendant l'installation de la première des trois centrales à béton prévues. Dans l'absence d'installation de préfabrication sur site et dans un souci de délai, trois caissons rectangulaires servant comme quais de rehausse ont été préfabriqués et acheminés d'Espagne. Les trois postes à claper et le quai de service ont été construits en blocs préfabriqués sur place. Les autres installations (ateliers de façonnage du ferrailage, protection cathodique, aires de montage des coffrages glissants, grues à tous, etc) se sont fait en temps masqué.

### 2.2 Fabrication des bétons

Le béton utilisé pour la préfabrication des caissons doit être conçu pour une durée de vie de 100 ans. Le dosage minimum en liant est de 420kg/m<sup>3</sup>, avec un rapport eau efficace liant total limité à 0,35. La résistance à la compression nominale à 28 j est supérieure à 40 MPa. Le coefficient de diffusion des chlorures à 90 jours sera au maximum  $1,5 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s pour la partie située au-dessus de -4 m hydro et de  $5 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s pour la partie au-dessous de -4 m hydro. L'enrobage est fixé à 80 mm. Les agrégats utilisés sont extraits d'une carrière ouverte spécialement pour les besoins du projet, située à moins de 8 km du site. Le liant utilisé est un ciment prise mer aux cendres volantes provenant de l'usine de Bouskoura distante de 350 km du site. Le béton de la zone de marnage et de

## Thème 4 – Ouvrages portuaires et offshore

la partie émergée des caissons a fait l'objet d'une formulation spécifique comprenant l'ajout de la fumée de silice permettant le respect du critère de diffusion de chlorures. Les formulations utilisées pour 1m<sup>3</sup> de béton sont détaillées dans le tableau 1.

Le béton fabriqué a une maniabilité de 20±3 cm tenant compte de la densité du ferrailage et la hauteur de bétonnage qui nécessite l'utilisation d'une pompe. La température du béton est limitée à 25°C à la sortie de la centrale et à 30°C à la mise en place. Le contrôle de ces deux caractéristiques et d'autres aspects liés à la mise en œuvre, à la cure du béton, etc, est assuré par les représentants du laboratoire de chantier, les contrôleurs qualité de l'entreprise et les contrôleurs TME présents sur site 24 heures/24.

Tableau 1. Composition des bétons des caissons.

	Quantité en kg	
	Q420 sans FS	Q420 avec FS
Sable fin	554	554
Sable grossier	236	236
GI classe 4/12,5mm	457	494
GII classe 12,5/20mm	650	648
Ciment CPJ55* PM CV	420	400
Fumée de silice	0	20
Eau efficace	143	143
Adjuvant superplastifiant Tempo10	8,4	7,56

\* selon la norme marocaine NM10.1.004, équivalent à CEM II de la norme EN 197-1.

### 2.3 Préfabrication à terre

A terre, sont réalisés le radier et 9,20 mètres de la hauteur des voiles sur les trois fonds de moule. Cette limite a été dictée par le gabarit et la capacité de levage du portique du système de mise à l'eau. A l'issue de cette phase le caisson a un poids d'environ 3400 tonnes.

#### 2.3.1 Radier

Le bétonnage du radier est fait sur un des trois fonds de moule préparés pour cela. Les tôles coffrantes sont enduites d'un produit de démoulage. Après la réalisation et validation du traçage du radier et voiles, et l'implantation des différents inserts selon le type de caisson, commence la phase de la mise en place des ferrailages (nappe inférieure, cages montées à l'avance à l'atelier, nappe supérieure et les attentes des voiles). Les inserts de levage du caisson sont ancrés dans le radier ce qui nécessite la mise en place des aciers renforts à ces endroits. La réception du ferrailage se fait au fur et à mesure de l'avancement, une réception définitive est faite à la fin en inspectant les coffrages latéraux, l'enrobage et la continuité électrique dans les armatures spécifiée par les plans de la protection cathodique. La réalisation du radier prend environ 8 jours de

travail.

Le radier des caissons a une épaisseur de 800 mm et une surface de 28 m × 28 m environ. Les travaux de réalisation des voiles et le décoffrage des parements latéraux du radier sont entamés après environ 12 h de maturation avec une résistance minimale à la compression de 7 MPa (voir figure 3).

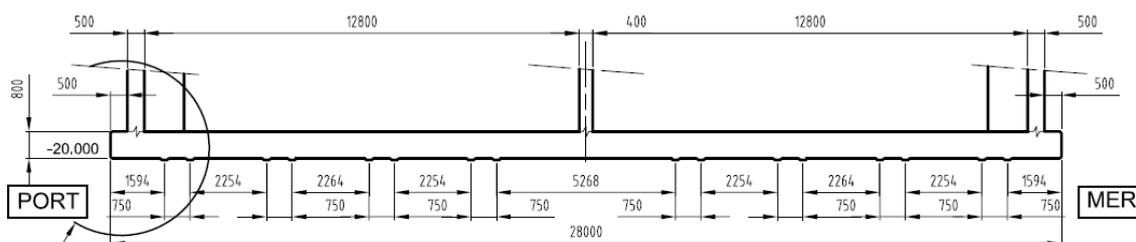


Figure 3. Coupe du radier du caisson.

### 2.3.2 Voiles – 1<sup>ère</sup> levée

Les voiles extérieures et intérieures des caissons ont respectivement une épaisseur de 500 mm et 400 mm. La première levée de bétonnage monte à +9.20 m au dessus du radier. La durée de montée du coffrage glissant pour cette levée est de 3 jours, le caisson ne peut être déplacé qu'après l'atteinte d'une résistance à la compression de 35 MPa et 20 MPa respectivement pour le radier et les voiles. Le coffrage glissant est constitué en plus d'une peau coffrante métallique raidie, de deux plateformes de travail intérieures et extérieures d'une largeur de 2.00 m, et de deux passerelles suspendues, intérieures et extérieures, permettant la finition du béton en sortie de coffrage glissant. Des étriers métalliques en forme de U renversés suffisamment rigides pour maintenir l'écartement entre panneaux de 500 mm ou 400 mm suivant l'épaisseur des voiles. Ces étriers sont espacés de 1,50 m à 2,50 m environ l'un de l'autre, et cela sur toute la longueur du coffrage. Des vérins creux de levée de 6 tonnes fixés sur chaque étrier permettent la montée du coffrage par pas de 23 mm en grimpant sur les tiges métalliques de montée. Les tiges de montée sont appuyées sur le plan constitué par la surface du radier et sont confinées dans une alvéole tubulaire de diamètre 35 mm formée dans le béton par un tube glissant ou fourreau. Ces tiges ont un diamètre de 33,7 mm et une longueur de 4 m et peuvent se visser les unes dans les autres. Les vérins sont reliés à des pompes hydrauliques par des flexibles et tuyaux d'alimentation en huile hydraulique. Les tiges sont démontées à l'issue du glissement (voir figures 4 et 5).

La réalisation de cette première levée des voiles commence par l'assemblage et la pose des armatures, la mise en place du coffrage glissant et des guides de maintien des attentes. Le ferrailage et le bétonnage avancent au fur et à mesure jusqu'à la hauteur 9,20 m en s'assurant de bien désactiver la surface pour la reprise de bétonnage.

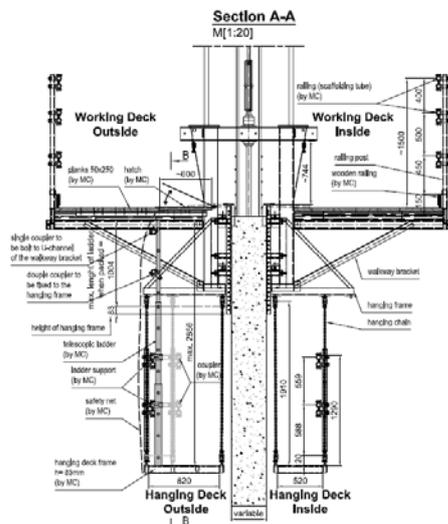


Figure 4. Coupe du coffrage glissant des voiles du caisson.

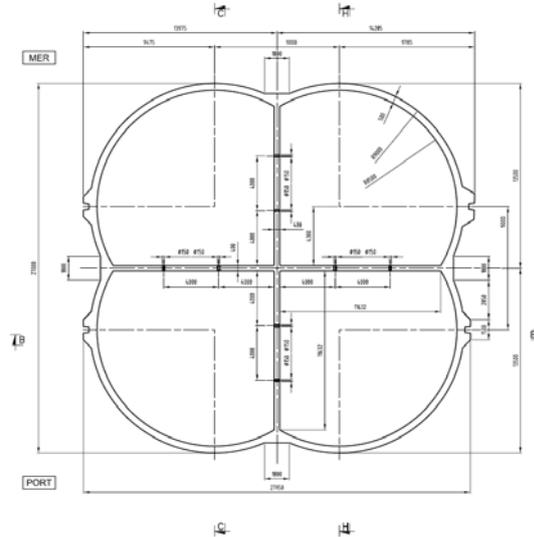


Figure 5. Vue en plan du caisson.

## 2.4 Transbordement, ripage et mise à l'eau du caisson

### 2.4.1 Transbordement et ripage

Après un délai de maturation d'environ 9 jours et après installation des équipements de remorquage, d'échouage, de levage et de ballastage, etc, le caisson est acheminé via le système de ripage et ou le transbordeur vers le portique de mise à l'eau. La station C1 est desservie par le transbordeur qui va jusqu'à la darse de mise à l'eau. Les stations C2 et C3 sont liées aux transbordeur par deux lignes de ripage (figure 6).

Le système transbordeur est composé principalement de 14 modules de levage automoteurs d'une capacité nominale unitaire 250 t, la course des vérins hydrauliques est de 300 mm maxi. Chaque vérin est équipé d'un capteur d'élongation et d'un capteur de pression. Une poutre métallique, relie transversalement l'avant des deux lignes de modules. Elle sert à supporter l'ensemble des flexibles et autres connections entre le chariot supportant les pompes et les deux lignes de modules. Cette poutre a un encombrement maxi imposé afin de permettre son passage sous les caissons posés sur les longrines. Deux chariots mobiles sont disposés en avant des modules de levage. Le premier pour la pompe hydraulique, enrouleur de câble électrique (110 m) et armoire de commande et le second pour la pompe hydraulique et le pupitre de pilotage. Le transbordeur est muni d'un système informatique embarqué permettant le fonctionnement en séquence automatique ou manuelle pour corriger une situation d'arrêt en cours de levage ou de déplacement par exemple. Le système donne les informations sur les paramètres de contrôle tels que la pression dans les vérins et indique à l'opérateur les opérations à réaliser pour retrouver une situation de reprise du fonctionnement (figure 7).

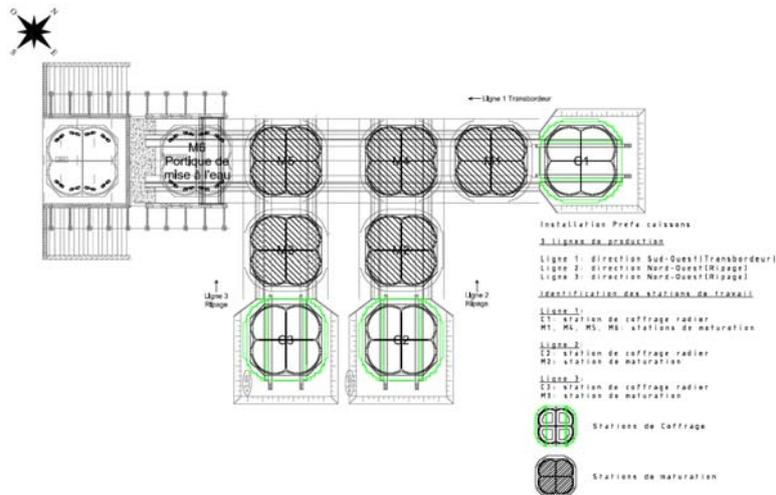


Figure 6. Vue en plan de la zone de transfert.

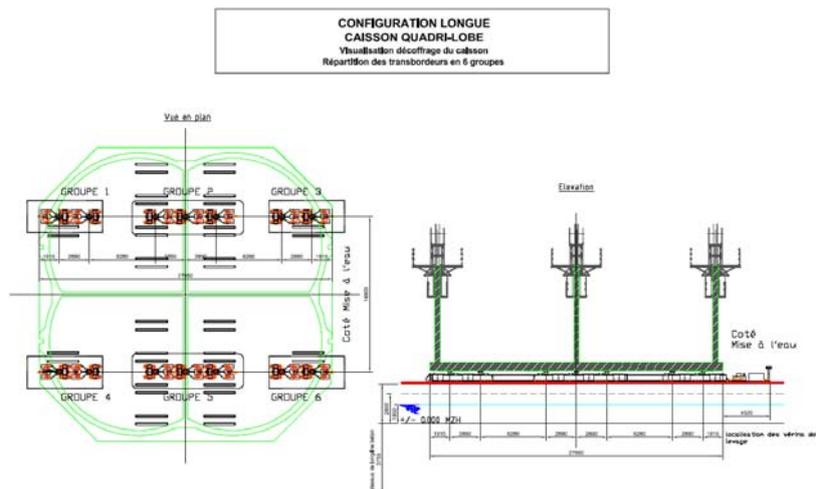


Figure 7. Système transbordeur des caissons.

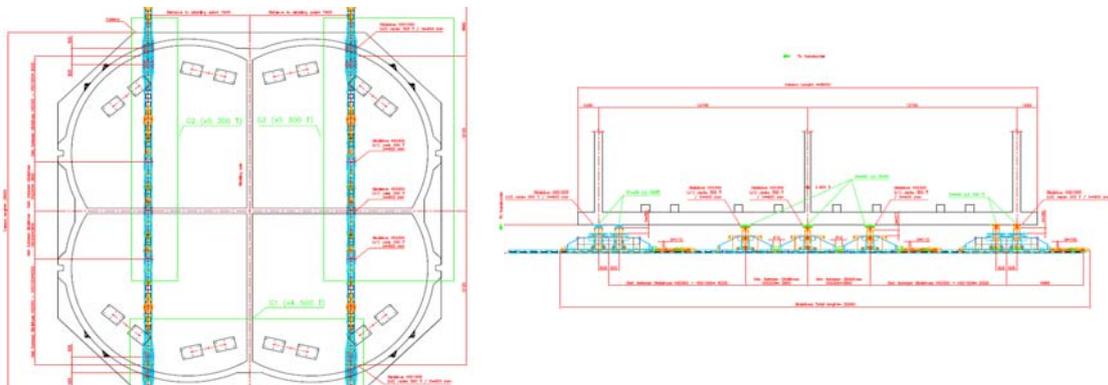


Figure 8. Système de ripage des caissons.

## Thème 4 – Ouvrages portuaires et offshore

Le système roule sur des rails Vignole 60 kg avec crapauds de fixation sur les longrines béton armé. Le déplacement est assuré par les moteurs de translation de chacun des modules. Les vitesses de déplacement sont de 2 m/mn en charge et 4 m/mn à vide. Le système de ripage est composé principalement de vérins verticaux (5 unités de 300 t et 2 unités de 500 t par ligne), vérins tire-pousse (3 unités de 60 t par ligne), des plaques de téflon pour ripage et des patins (figure 8).

### 2.4.2 Mise à l'eau

La mise à l'eau des caissons est faite par un portique de levage porté par une structure en béton armé (poutres, poteaux, longrines) fondée sur des pieux. Les parois de la darse sont faites de pieux sécants. Le portique de levage est constitué principalement de quatre poutres métalliques et huit vérins de levage. Le déplacement du vérin est assuré par un système de ripage identique à celui présenté ci-avant (figure 9).

### 2.5 Préfabrication à quai

Une fois le caisson mis à l'eau, il est remorqué vers l'un des trois quais de rehausse. Le bétonnage des voiles est repris pour arriver jusqu'au niveau de la dalle. Dans cette partie la montée du coffrage glissant est ralentie par rapport à la première à cause de la mise en place d'anodes rubans tous les 20 cm et les bandes conductrices prévues par la protection cathodique à courant imposé adoptée par le projet. Les anodes tubulaires sont mises en place au niveau de la zone immergée en dessous de -4 mètres hydro. Trois zones ont été identifiées, la zone de marnage et émergée, la zone immergée et la zone en contact avec du remblai. La durée de montée du coffrage glissant pour cette levée est de 4 jours, soit 8 postes.

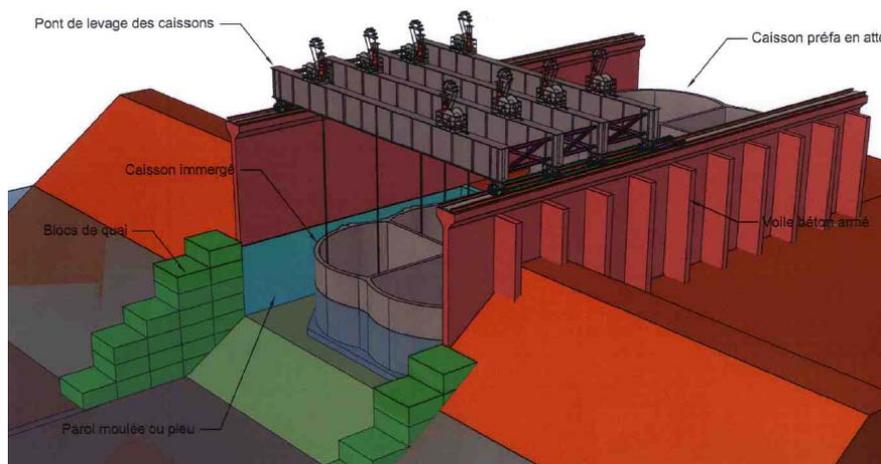


Figure 9. Portique de levage et darse de mise à l'eau des caissons.

### **3. Pose des caissons**

#### **3.1 Réalisation de la fondation**

La fondation des caissons est constituée de trois couches de matériaux. Le noyau de cette fondation est constitué en tout-venant 1/500 kg, surmonté d'un matériau 0/160 mm écrêté à la benne preneuse et d'un ballast 20/63 mm nivellé à plus ou moins 5 cm de la cote cible. Les talus de cette fondation sont protégés par des enrochements. L'ensemble des matériaux des fondations des digues à caissons est mis en place par clapage. La séquence de réalisation commence par le clapage du TV 1/500 kg, les coupes sont validées par un contrôle bathymétrique. Ensuite le clapage du matériau 0/160 mm qui, en fonction du résultat de la bathymétrie, subit un écrêtage par benne preneuse afin de respecter les tolérances, à savoir une épaisseur minimale de 20 cm et maximale de 1 m. La mise en place et positionnement du niveleur à ballast, qui est suspendu sur les câbles sous la barge, sur la surface d'un demi-caisson peut être entamé. Un passage à vide de la lame par pas de 5m est effectué afin de vérifier la tolérance sur l'épaisseur du ballast (0.5-1.0 m) ainsi que le volume théorique du ballast à mettre en place. Ce ballast est approvisionné et mis en place par la goulotte installée à l'extrémité de la barge. Les plongeurs guident la goulotte devant la lame du niveleur afin que le niveau ne dépasse pas les 40cm. Un contrôle d'altimétrie du niveleur à la fin du nivellement est effectué afin d'assurer qu'il n'a pas bougé pendant le passage de lame. Le déplacement et le positionnement du niveleur sur la seconde surface d'un demi-caisson est fait pour démarrer le nivellement de cette partie. La surface peut recevoir un caisson.

#### **3.2 Echouage et ballastage des caissons**

Une fois l'assise réceptionnée, le caisson est remorqué vers sa position finale, la séquence d'échouage commence par l'équipement du caisson mis en flottaison. Les ancres sont implantées sur le site d'échouage. Les remorqueurs sont connectés aux pattes d'oie du caisson – le caisson est désamarré du quai de rehausse. Le caisson est remorqué jusqu'au site d'échouage, il est stabilisé par ballastage et déballastage. Les lignes d'ancres, les ancres de queue et de tête (ancres de secours) et les lignes croisées des caissons (N) et (N-1) sont connectées. L'échouage du caisson est effectué par ballastage grande masse du caisson, un système informatique lié par GPS permet le suivi de la position en temps réel du caisson. L'accostage du caisson (N) sur le caisson (N-1) s'effectue doucement et par la suite la pose du caisson sur l'assise et son ballastage complet en eau de mer. Le caisson est déséquipé des éléments d'accastillage, des plateformes et des passerelles (figure 10). Il est ensuite ballasté par stérile de carrière 0/80mm en utilisant un convoyeur ou en sable de dragage refoulé par drague "Rainbow".

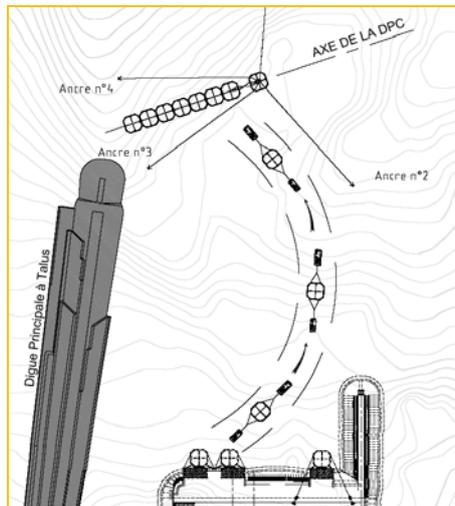


Figure 10. Pose et échouage des caissons.

### 3.3 Réalisation des superstructures

Les superstructures des caissons sont constituées d'une dalle, d'un muret central et d'un muret arrière. Elles sont réalisées au fur et à mesure de l'avancement de la pose et du ballastage. La dalle fait 800 mm d'épaisseur, le muret central fait 3 mètres de hauteur.

## 4. Conclusion

La technique de réalisation des ouvrages de protection par des caissons nécessite la maîtrise de certaines techniques de pointe : mise au point d'un béton durable en assurant un contrôle permanent et rigoureux des matériaux utilisés (agrégats, ciment, adjuvant, etc), déplacement à terre et levage de structures gigantesques avec un poids qui avoisine les 3400 tonnes, protection cathodique, etc. Elle présente des avantages en terme de coût et de délai, en permettant une économie d'environ un tiers des matériaux par rapport à la technique de digue à talus, et par conséquent moins de matériaux à extraire et un plus faible impact environnemental. Par ailleurs, comparativement à une digue à talus, elle présente des difficultés majeures, au niveau des réparations en cas de choc accidentel d'un navire, et un surcoût lié à la maintenance et l'entretien des équipements de la protection cathodique.

## 5. Bibliographie consultée

AFPC, AFREM (1997). *Méthodes recommandées pour la mesure des grandeurs associées à la durabilité*. Journées techniques durabilité des bétons, 11-12 Décembre 1997, Toulouse France.

CETMEF (2001). *Recommandations ROSA 2000 pour le calcul aux états limites des ouvrages maritimes et fluviaux*. Presses de l'école nationale des ponts et chaussées.

LCPC (1994). *Recommandations pour la prévention des désordres dus à l'alcali-réaction*. Juin 1994, 53 p.