



© PHOTOTHÉQUE SETEC TPI

# INSPECTION ET DIAGNOSTIC DU BATEAU-PORTE DE LA FORME 10 À MARSEILLE

AUTEURS : TANCRÈDE DE FOLLEVILLE, INGÉNIEUR EN CHEF, SETEC TPI - CHRISTOPHE RAULET, DIRECTEUR GÉNÉRAL, DIADÈS -  
BERNARD QUENÉE, DIRECTEUR GÉNÉRAL DÉLÉGUÉ, LERM

LA FORME DE RADOUB N°10 DU PORT DE MARSEILLE EST UN OUVRAGE DE GRANDES DIMENSIONS DESTINÉ À LA RÉPARATION NAVALE. N'ÉTANT QUASIMENT PLUS UTILISÉE DEPUIS UNE DIZAINE D'ANNÉES, SA REMISE EN EXPLOITATION PROCHAINE NÉCESSITE LA CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU BATEAU-PORTE. LE CHANTIER DOIT SE DÉROULER À L'INTÉRIEUR MÊME DE LA FORME 10 ET IL FAUT DONC S'ASSURER QUE L'ANCIEN BATEAU-PORTE EST APTE À ISOLER UNE DERNIÈRE FOIS LA FORME DE LA MER, LE TEMPS DE LA DURÉE DES TRAVAUX. LE PORT DE MARSEILLE DEMANDE DONC UNE EXPERTISE DE L'OUVRAGE.

## CONTEXTE DE L'OPÉRATION

La forme de radoub n°10 du Grand Port Maritime de Marseille (GPMM) est un ouvrage aux dimensions hors norme : 465 m de longueur, 85 m de largeur et 14 m de hauteur. Avec un volume de 480 000 m<sup>3</sup>, c'est la troi-

sième plus grande forme de réparation navale au monde, après celles de Dubaï et de Lisbonne. Elle fut construite entre 1972 et 1976 pour recevoir la nouvelle génération des navires « Supertanker », ULCC (Ultra Large Crude Carriers), des pétroliers de 700 000 t à 800 000 t

**1- La forme 10  
du GPMM vue  
d'avion.**

**1- Aerial view  
of GPMM dry  
dock 10.**

(figure 2). Cette forme est isolée de la mer par un bateau-porte, ouvrage monolithique en béton précontraint, de forme parallélépipédique de 87,35 m de longueur, 15 m de largeur et 13,5 m de hauteur. En plan, le bateau-porte est constitué de trois cloisons longitudinales



2- Le supertanker Batillus en cale sèche dans la forme 10.

3a- Bateau-porte - vue en plan.

3b- Bateau-porte - vue en coupe.

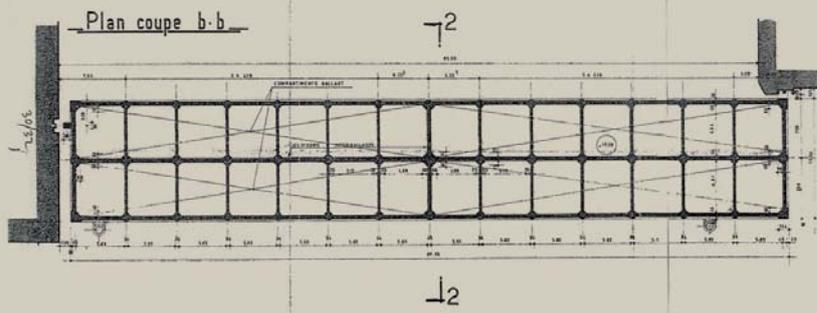
2- The supertanker Batillus in dry dock 10.

3a- Floating caisson - plan view.

3b- Floating caisson - cross-section view.

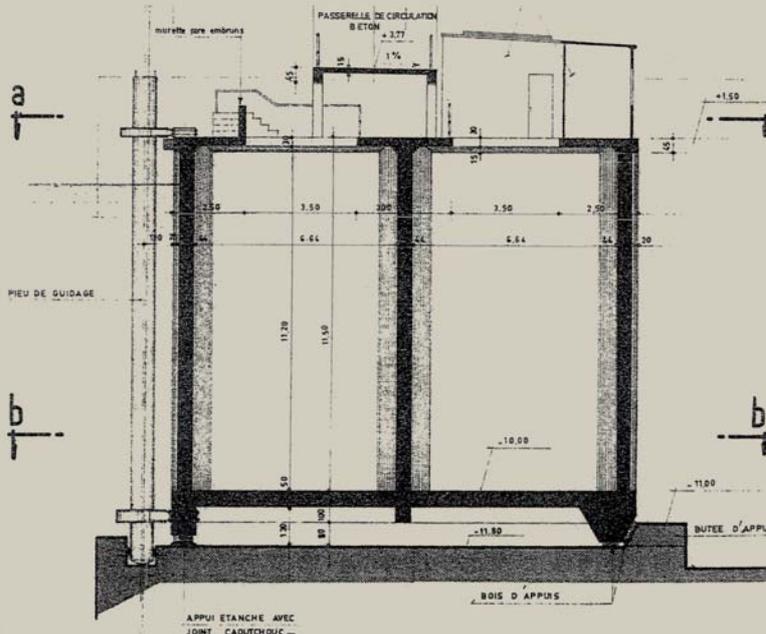
© PHOTO THÉQUE SETEC TPI

### BATEAU-PORTE - VUE EN PLAN



© PHOTO THÉQUE SETEC TPI

### BATEAU-PORTE - VUE EN COUPE



© PHOTO THÉQUE SETEC TPI

et de quinze cloisons transversales qui délimitent les vingt-huit alvéoles identiques de dimensions intérieures 5,82 m x 6,64 m groupées en quatre compartiments de ballast. Les épaisseurs de béton sont de 0,50 m pour la dalle de fond, 0,44 m pour les parois longitudinales, 0,45 m pour les parois transversales d'extrémité et inter-ballast, 0,34 m pour les parois transversales, et 0,30 m pour le pont supérieur. La précontrainte de la structure est totale ; elle est assurée par des câbles 12T13 de classe TBR (procédé STUP), verticalement par des boucles et horizontalement par des câbles droits. La dalle de fond, les cloisons et le pont supérieur sont précontraints dans deux directions à des taux variant entre 2,7 MPa et 4,0 MPa pour un béton ayant une résistance d'origine d'environ 30 MPa. Les câbles, d'une densité moyenne de 51 kg/m<sup>3</sup>, sont protégés par des gaines rigides raccordées par des manchons spéciaux étanches (figures 3a & 3b).

Le pont supérieur du bateau-porte est équipé d'une passerelle de circulation à la cote +3,50 m permettant le passage des véhicules utilitaires.

L'étanchéité verticale est réalisée par deux ventelles métalliques munies de bavettes en caoutchouc plaquées par la pression de l'eau. L'étanchéité basse est assurée par un joint en caoutchouc précomprimé, encadré et protégé par les bois d'appui en azobé. La ligne d'appui horizontale étanche se retourne sous les parois d'extrémité de la porte pour permettre la continuité avec les ventelles.

En position de fermeture, le bateau-porte est autostable et se comporte comme un barrage poids. Il est échoué sur deux lignes d'appuis.



4



6



5



7

L'appui côté mer transmet au seuil des réactions verticales comprimant le dispositif d'étanchéité, tandis que l'appui côté forme transmet au seuil outre les réactions verticales, les composantes horizontales de poussée de l'eau.

En position de garage, le bateau-porte flotte (tirant d'eau de 8 m) et il est amarré au voisinage immédiat de la forme 10 (figure 4).

Cette forme connaît une activité florissante jusqu'au milieu des années 80 qui marque la disparition progressive des supertankers.

Par la suite, l'exploitation de l'ouvrage rencontre des hauts et des bas jusqu'au début des années 2000. L'exploitation s'arrête définitivement en 2002, et même si le port se sert encore occasionnellement de la forme comme d'une simple ligne d'amarrage supplémentaire pour des navires de passage, le bateau-porte, lui, n'est plus guère utilisé.

En 2011 le port de Marseille décide de réhabiliter la forme 10 pour travailler notamment sur le nouveau marché de la réparation navale des navires

**4- Bateau-porte au mouillage dans le port de Marseille.**

**5- Travaux de réparation réalisés en l'an 2000.**

**6- Inspection des parements extérieurs par nacelle télescopique.**

**7- Inspection des caissons par cordistes.**

**4- Floating caisson at anchor in the port of Marseille.**

**5- Repair work performed in the year 2000.**

**6- Inspection of external cladding by telescopic work platform.**

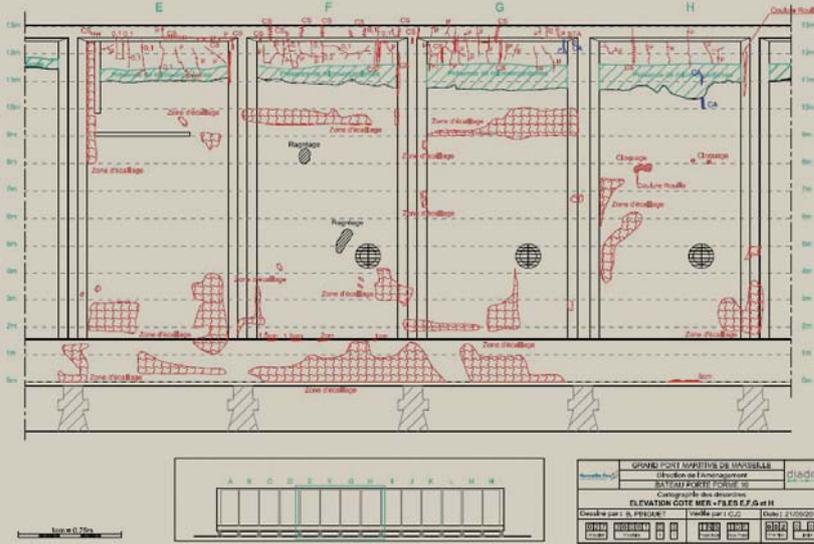
**7- Inspection of caissons by rope-harnessed personnel.**

de croisières, dont le nombre et la taille connaissent un essor important. En effet, 65% de la flotte mondiale de grands bateaux de croisière passent en Méditerranée où aucune offre de réparation appropriée n'est actuellement disponible. Une convention d'exploitation de la forme 10 est signée en juin 2012 avec un groupement d'entreprises internationales pour une durée de 25 ans.

C'est dans ce contexte, que le port de Marseille décide de construire un nouveau bateau-porte, car l'ancien, déjà âgé de près de 40 ans, n'est plus conforme aux nouveaux règlements. De surcroît, il n'a pas été utilisé depuis 10 ans et son état relativement vétuste ne permet pas d'envisager raisonnablement une remise en service pour les 25 années à venir.

Il faut donc construire un nouveau bateau-porte, mais compte-tenu des dimensions du futur ouvrage, qui sera assez similaire à son prédécesseur, le

## EXEMPLE DE CARTOGRAPHIE DES DÉSORDRES



8- Exemple de cartographie des désordres.

9- Couleur de rouille sur les parements du bateau-porte.

10- Fenêtre pathologique pour examen visuel de la précontrainte.

11- Profils de concentration en chlorures totaux dans les échantillons prélevés côté Forme.

8- Example of damage mapping.

9- Rust streak on the cladding of the floating caisson.

10- Damage viewer for visual inspection of prestressing.

11- Total chloride concentration profiles in the samples taken on the dry dock side.

© PHOTO THÉQUE SETEC TPI

8



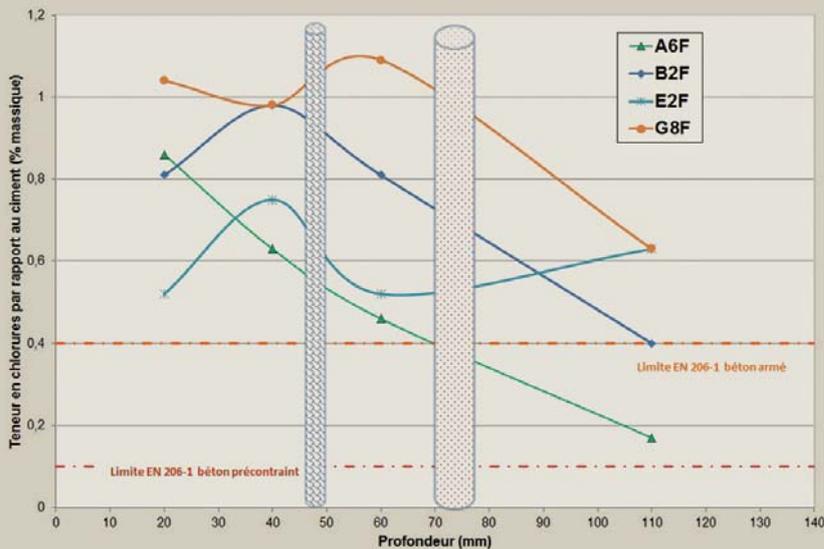
© PHOTO THÉQUE SETEC TPI

9



10

## PROFILS DE CONCENTRATION EN CHLORURES TOTAUX DANS LES ÉCHANTILLONS PRÉLEVÉS CÔTÉ FORME



© PHOTO THÉQUE SETEC TPI

11

choix de réaliser le chantier à l'intérieur même de la forme 10 s'impose rapidement comme une évidence.

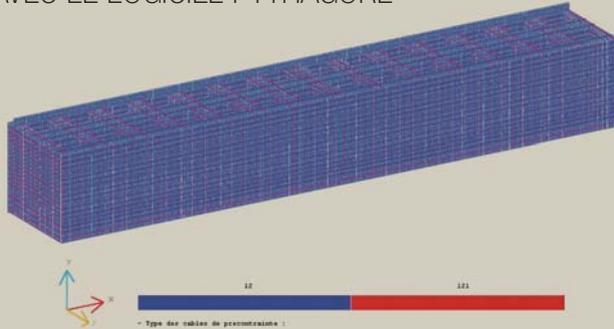
Le port doit alors s'assurer que l'ancien bateau-porte est encore capable de remplir sa fonction une dernière fois, le temps de fermer la forme 10 pour abriter la construction de son remplaçant. Il faut faire vite, car la livraison du nouveau bateau-porte est prévue au cours du second semestre 2015.

## INSPECTION DÉTAILLÉE EXCEPTIONNELLE

Même s'il a fait l'objet de travaux de réparation en l'an 2000 (figure 5) et d'un contrôle de sa structure par Setec TPI en 2002, le bateau-porte laisse entrevoir sur sa partie émergée un certain nombre de désordres.

Le GPMM décide donc en juillet 2012, de confier au groupement Diadès/Lerm/Setec TPI (trois sociétés du groupe Setec) une mission d'expertise complète de l'ouvrage dont l'objectif final est de définir et d'estimer financièrement les travaux indispensables et les instrumentations à mettre en place pour fiabiliser l'utilisation du bateau-porte pendant la durée du chantier. ▷

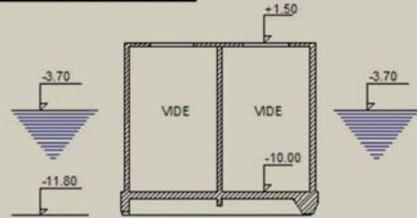
MODÈLE ÉLÉMENTS FINIS DU BATEAU-PORTE AVEC LE LOGICIEL PYTHAGORE®



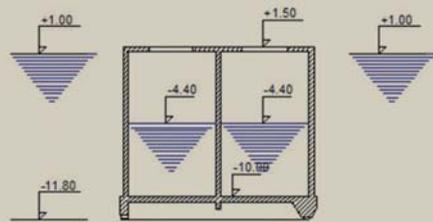
12

CAS DE CHARGE D'UTILISATION NORMALE DU BATEAU-PORTE

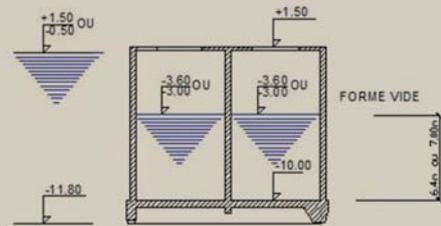
a1 - FLOTTAISON LEGE



a2 - FLOTTAISON A L' ECHOUAGE



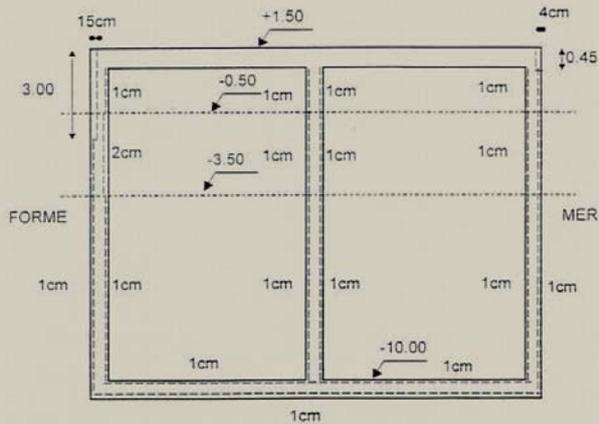
a3 - BATEAU SUR APPUIS



14

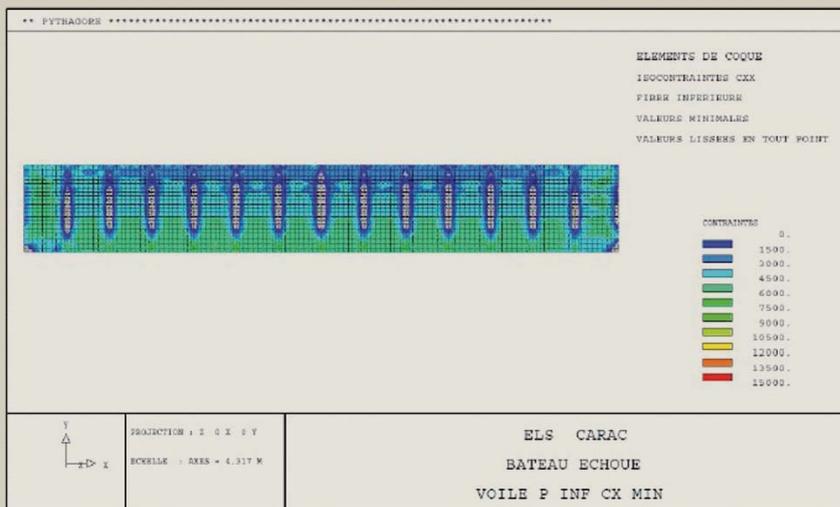
© PHOTO THÉQUE SETEC TPI

CARTE DES RÉDUCTIONS DES ÉPAISSEURS PRISE EN COMPTE DANS LES CALCULS



13

DIAGRAMME DE CONTRAINTE SOUS ELS CARACTÉRISTIQUE



15

© PHOTO THÉQUE SETEC TPI

12- Modèle éléments finis du bateau-porte avec le logiciel Pythagore®.

13- Carte des réductions des épaisseurs prise en compte dans les calculs.

14- Cas de charge d'utilisation normale du bateau-porte.

15- Diagramme de contrainte sous ELS caractéristique.

12- Finite element model of the floating caisson with the Pythagore® software.

13- Map of thickness reductions allowed for in the calculations.

14- Load case for normal use of the floating caisson.

15- Diagram of strain in characteristic SLS.



16

© PHOTOTHÈQUE SETEC TPI

La première étape consiste en une inspection détaillée permettant d'actualiser la cartographie et l'intensité des pathologies qui affectent ses différents constituants (béton, armatures passives, armatures de précontrainte, dispositifs d'accostage...).

Le bateau-porte est alors convoyé jusqu'à la forme 9 où il est mis en cale sèche durant 4 semaines au mois d'août 2012.

Le port procède d'abord à un important nettoyage de l'ouvrage permettant de dégager les parements extérieurs des divers dépôts marins qui les recouvrent. L'intervention de la société Diadès peut alors commencer. Elle se déroule sur une durée record d'une semaine, du 13 au 20 août 2012.

Le programme des investigations a été soigneusement préparé en amont, sur la base des rapports des visites de contrôles antérieures, l'ouvrage ayant toujours fait l'objet d'un suivi assez régulier depuis sa mise en service. L'inspection des parements extérieurs

**16- Chantier du nouveau bateau-porte dans la forme 10.**

**16- Work on the new floating caisson in dry dock 10.**

est réalisée à l'aide de nacelles télescopiques positives (figure 6), tandis que l'intérieur des caissons est visité par des cordistes (figure 7).

Tous les désordres observés sont méthodiquement répertoriés puis cartographiés sur une quarantaine de plans développés de toutes les faces de la structure (figure 8).

Les principales pathologies recensées sont des coulures de rouille témoignant de la corrosion des armatures passives, plus particulièrement marquée dans les

zones de marnage où le foisonnement des aciers provoque localement des éclats de béton (figure 9).

Les dispositifs d'accostage sont également fortement corrodés.

Les spécialistes du Lerm (Laboratoire d'Études et de Recherche sur les Matériaux) interviennent ensuite pour effectuer des prélèvements de plusieurs échantillons (carottages de béton, coulis de précontrainte, etc.) destinés aux analyses chimiques en laboratoire. Ils procèdent également à l'ouverture de fenêtres pathologiques pour examiner visuellement l'état des câbles (figure 10).

Sur les 4 fenêtres réalisées, aucune anomalie de remplissage des gaines n'est constatée et seul un léger enrouillement de certains conduits intérieurs ainsi que quelques piqûres de corrosion sur les fils sont observés. L'expertise de la précontrainte est complétée par des clichés de gammagraphie et des tirs d'arbalète (voir encadré).

#### ANALYSE DES MATÉRIAUX EN LABORATOIRE

Les analyses chimiques réalisées par le Lerm permettent d'établir un diagnostic sur l'état des matériaux du bateau-porte :

Le béton dont la résistance caractéristique d'origine était de 30 MPa a continué à durcir au fil du temps. Les résultats des essais d'écrasement menés sur 8 sondages carottés donnent ainsi des valeurs de résistance caractéristique allant de 52,5 MPa coté forme à 58,8 MPa côté mer.

Compte-tenu de l'environnement marin particulièrement agressif dans lequel le bateau-porte est utilisé, la détermination du taux de chlorures dans le béton constitue également un critère important pour évaluer la corrosion des armatures et donc l'état de conservation général de l'ouvrage. Les chlorures totaux sont déterminés par potentiométrie après attaque acide ménagée : ils sont dosés dans les bétons provenant du côté forme et ►

du côté mer, à plusieurs profondeurs (10/25 mm ; 30/45 mm ; 50/65 mm et 100/115 mm), afin de mettre en évidence leur pénétration.

Les résultats obtenus sont d'une part exprimés en fonction de la masse de béton, et d'autre part rapportés à la masse de ciment, afin de comparer les valeurs obtenues avec les seuils réglementaires (figure 11). Ils montrent des teneurs en chlorures très élevées et supérieures aux spécifications en vigueur, et ce jusqu'à 115 mm de profondeur, c'est-à-dire au-delà de l'enrobage minimal des aciers passifs (45 mm) et de celui des gaines de précontrainte (70 mm). Les concentrations sont plus élevées côté forme que côté mer à cause de la succession des cycles d'humidité et de séchage.

Le pH du coulis des gaines de précontrainte est également déterminé afin d'estimer le rapport Cl-/OH-. Selon Hausmann, le seuil critique de dépassement à partir duquel s'amorce la corrosion correspond à un rapport Cl-/OH- de 0,6.

Les mesures réalisées conformément aux paragraphes § 6.3.2, § 6.5 et § 7.3 de la norme XP P 18-458 de novembre 2008 montrent que le coulis prélevé est caractérisé par un rapport Cl-/OH- nettement inférieur à la valeur de 0,6 considérée comme seuil d'initiation de la corrosion.

## VÉRIFICATION DE LA STRUCTURE

La troisième phase de l'opération consiste en un recalcul complet de l'ouvrage réalisé par les ingénieurs de Setec TPI.

Le bateau porte, calculé à l'époque de sa construction (1973-1974) suivant les règles du CCBA 68 et de l'instruction provisoire IP1, est vérifié en considérant la réglementation vigueur (Eurocode 2 et BPEL 99) et en tenant compte de son état actuel :

Pour le béton, la résistance caractéristique à la compression prise en compte est de 40 MPa, valeur conservatrice par rapport aux résultats des essais du Lerm (55 Mpa) mais supérieure au dimensionnement d'origine :  $\sigma_{28} = 30$  MPa.

Pour la précontrainte, les résultats satisfaisants de l'inspection permettent de modéliser les câbles sans diminution de section avec la précontrainte théorique après pertes différées :  $115 \text{ kN} < P < 120 \text{ kN/toron}$ , valeur conservatrice par rapport aux résultats des essais d'arbalète  $P = 130 \text{ kN/toron}$ . Soit une précontrainte moyenne  $P \approx 0,79 \times P_{\text{initiale}}$ .

Le calcul de l'ouvrage est effectué à partir d'un modèle aux éléments finis réalisé à l'aide du logiciel Pythagore® développé par Setec TPI, permettant de modéliser l'ensemble du bateau-porte et sa précontrainte (figure 12).

Les calculs de vérification de la structure sont menés sur la base de la géométrie initiale, mais en intégrant, dans certaines sections, des réductions d'épaisseur de béton ou d'aciers passifs en fonction des désordres constatés sur l'ouvrage.

Le béton projeté mis en œuvre lors de la réparation de l'an 2000 n'est pas pris en compte dans les sections de calcul, de même que le béton de réparation (mortier prêt à l'emploi) mis en œuvre lors de la réparation de 1991. La section des armatures passives est également réduite pour tenir compte de la corrosion. La réduction est proportionnelle à la diminution d'épaisseur du béton (figure 13).

La modélisation prend en compte le phasage des éléments de construction (coulage des éléments en damier horizontalement en 4 phases, coulage du radier puis de 5 levées successives, début du coulage le 1<sup>er</sup> janvier 1974 avec 1 mois pour chaque levée, 6 mois entre le coulage du premier élément

**17- Principe de l'essai à l'arbalète.**

**17- Crossbow test principle.**

## EXPERTISE DE LA PRÉCONTRAÎTE

Une partie de l'inspection détaillée a été spécialement consacrée à l'expertise de la précontrainte, réalisée par gammagraphie et tirs d'arbalète.

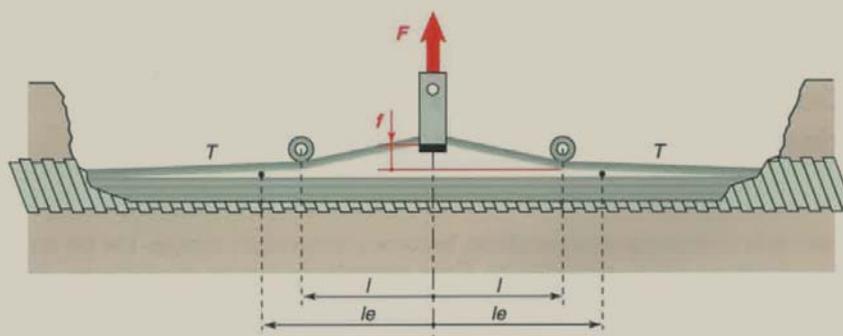
### TIRS D'ARBALÈTE

Les tirs d'arbalète ont été effectués par le Lerm. Le but est de déterminer la tension résiduelle réelle dans les câbles de précontrainte à l'aide d'un essai non destructif à partir d'une fenêtre pathologique. Le principe de base du fonctionnement de l'arbalète est fondé sur le fait que plus une armature est tendue, plus l'effort  $F$  nécessaire à la dévier de son tracé d'une flèche  $f$  sera important. L'arbalète, munie d'un capteur de déplacement et d'un capteur de force, s'appuie sur l'armature testée par deux roulettes, et exerce l'effort de déviation par l'intermédiaire d'une fourchette qui saisit l'armature à mi-empatement. La flèche communiquée à l'armature au cours de l'essai est limitée à 3% de sa demi-longueur  $l$ , de manière à limiter également les contraintes supplémentaires de flexion générées par l'essai. Les mesures de la tension résiduelle des fils de précontrainte par l'essai à l'arbalète, sont encadrées par le guide technique du LCPC « Mesure de la tension des armatures de précontrainte à l'aide de l'arbalète » de novembre 2009 (figures 17 et 18).

### GAMMAGRAPHIE

Les clichés de gammagraphie permettent de contrôler la bonne injection des gaines de précontrainte et d'identifier le cas échéant les zones potentielles de corrosion. 13 clichés de gammagraphie ont été réalisés par le CETE de Lyon, sous-traitant de Diadès sur cette opération. Les clichés sont pris à l'aide d'une source radioactive qu'on approche des parements et qui impressionne un film positionné de l'autre côté (figure 19). Le programme de la campagne de gammagraphie a été déterminé par la société Diadès, en fonction des résultats des précédentes d'auscultation réalisées entre 1979 et 2000. L'épaisseur des âmes des caissons, qui peut atteindre 50 cm, nécessite l'emploi d'un support sensible rapide (résolution de 100  $\mu\text{m}$ ) et d'une distance source-film de 90 cm pour limiter le temps d'exposition à 35 minutes et obtenir une bonne qualité d'image. La source utilisée est du cobalt 60 (figure 20). L'extraction des radiogrammes se fait par lecture laser et leur validation est effectuée dans un fourgon à proximité du site (figure 21). Les 13 radiogrammes obtenus ont permis d'examiner 5 câbles verticaux à différentes hauteurs, et 10 câbles longitudinaux (dont deux en deux points). Aucun défaut significatif de remplissage des conduits n'a été observé, en dehors de deux très petits vides en haut de conduit (2 à 3 mm). Ces manques de coulis, qui ne touchaient pas les torons de précontrainte, n'ont pas justifié une ouverture de fenêtre spécifique.

### PRINCIPE DE L'ESSAI À L'ARBALÈTE





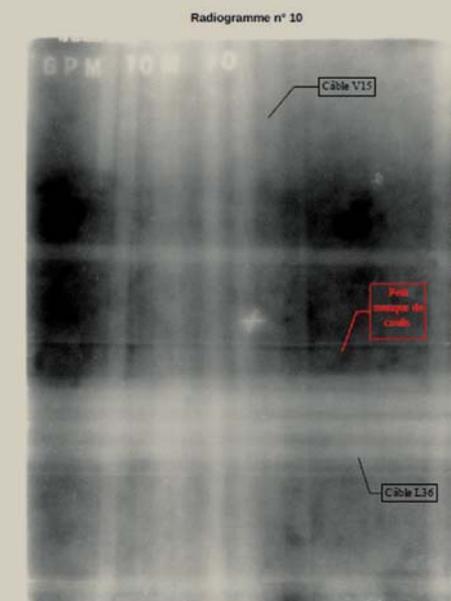
© PHOTO THÉÂTRE SETEC TPI

18



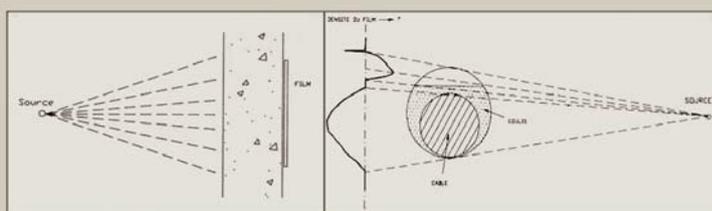
20

## RADIOGRAMME



21

## PRINCIPE DE LA GAMMAGRAPHIE



© PHOTO THÉÂTRE SETEC TPI

19

de radier et du dernier élément de la levée 5). L'intégralité de la précontrainte est appliquée 5 jours après le coulage du dernier élément de béton de la porte. Les effets différés jusqu'au 1<sup>er</sup> janvier 2013 sont ensuite calculés au moyen du logiciel de calcul.

La structure est vérifiée pour l'ensemble des situations normales et exceptionnelles (figure 14).

Les calculs montrent que l'ouvrage ne respecte pas les critères de maîtrise de la fissuration des Eurocodes (EN 1992-1-1 § 4.2), qui exigent pour les bétons de classe XS3 (zones de marnage, zones soumises à des projections ou à des embruns) une non-décompression

**18- Essai à l'arbalète sur le bateau-porte.**

**19- Principe de la gammagraphie.**

**20- Source de cobalt 60.**

**21- Radiogramme.**

**18- Crossbow tests.**

**19- Principle of gammagraphy.**

**20- Source of cobalt 60.**

**21- Radiograph.**

du béton à l'ELS fréquent (figure 15). Cependant, l'ouvrage ne présente pas de situations exceptionnelles de ballastage qui ont été étudiées.

L'ensemble des résultats de cette mission a donc permis de conclure

que l'ouvrage actuel était apte à assurer, à court terme, la fermeture de la forme 10 pendant le temps de construction du nouveau bateau-porte. À l'heure où nous écrivons ces lignes, la construction du nouveau bateau-porte a commencé (figure 16). □

## INTERVENANTS DU PROJET

**MAÎTRE D'OUVRAGE :** Grand Port Maritime de Marseille

**INTERVENANTS :** Setec TPI, Diadès, Lerm

**SOUS-TRAITANTS :** CETE de Lyon

## ABSTRACT

### INSPECTION AND DIAGNOSIS OF THE FLOATING CAISSON OF DRY DOCK 10 IN MARSEILLE

T. DE FOLLEVILLE, SETEC TPI - C. RAULET, DIADÈS - B. QUENÉE, LERM

**At the request of Grand Port Maritime de Marseille, the consortium formed by Diadès, Lerm and Setec TPI is performing a check-up on the floating caisson of dry dock No. 10 to ensure that it is capable of performing its function after ten years without being used. The assignment breaks down into three phases: a detailed inspection to identify any damage, laboratory tests on the component materials of the structure, and a verification of the structure by finite-element calculation. The detailed inspection is supplemented by specific diagnosis of the prestressing, performed by gammagraphy films and crossbow tensile/compression tests. □**

### INSPECCIÓN Y DIAGNÓSTICO DEL BARCO PUERTA DEL DIQUE DE CARENA 10 EN MARSELLA

T. DE FOLLEVILLE, SETEC TPI - C. RAULET, DIADÈS - B. QUENÉE, LERM

**A petición del gran puerto marítimo de Marsella la agrupación de las empresas Diadès, Lerm, y Setec TPI realiza una peritación del barco puerta del dique de carena n° 10 para cerciorarse de su capacidad para realizar su función después de diez años sin ser utilizado. La misión se divide en tres fases, una inspección detallada que permite recopilar todos los desórdenes, ensayos de laboratorio sobre los materiales que constituyen la estructura y una comprobación de la estructura mediante un cálculo de los elementos acabados. La inspección detallada se completa con un diagnóstico específico del pretensado, realizado con imágenes gammagráficas y tiros de ballesta. □**