



Inspection et diagnostic de l'état du bateau-porte de la forme 10. Grand Port Maritime de Marseille (13)

AFGC - 19 Mars 2015

T. De FOLLEVILLE

Inspection et diagnostic de l'état du bateau-porte de la forme 10. Grand Port Maritime de Marseille (13)

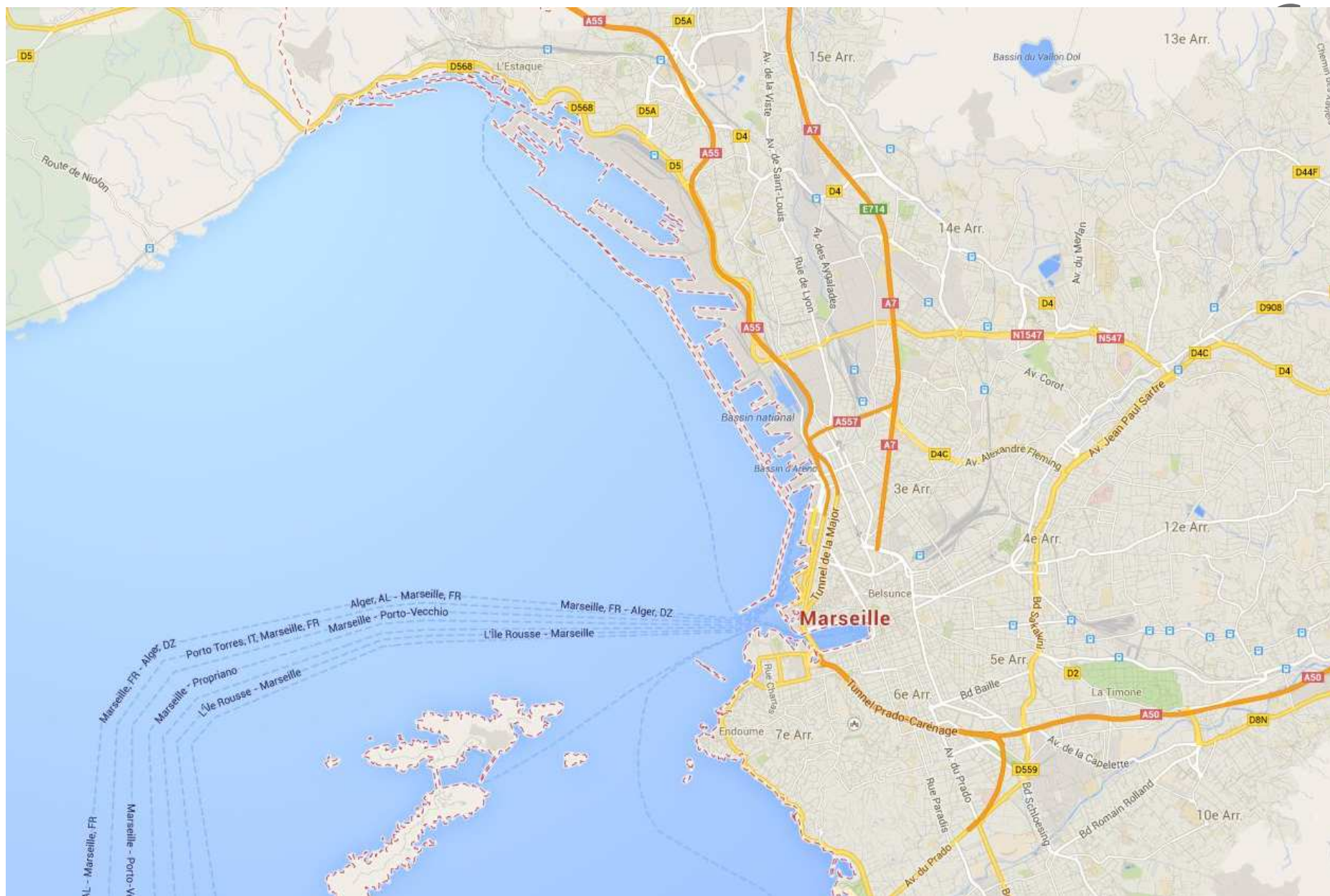
1. Présentation de l'ouvrage
2. Contexte de la mission
3. Inspection détaillée - (Diadès)
4. Examen de la précontrainte et analyses en laboratoire - (Lerm)
5. Expertise de la structure - (Setec tpi)

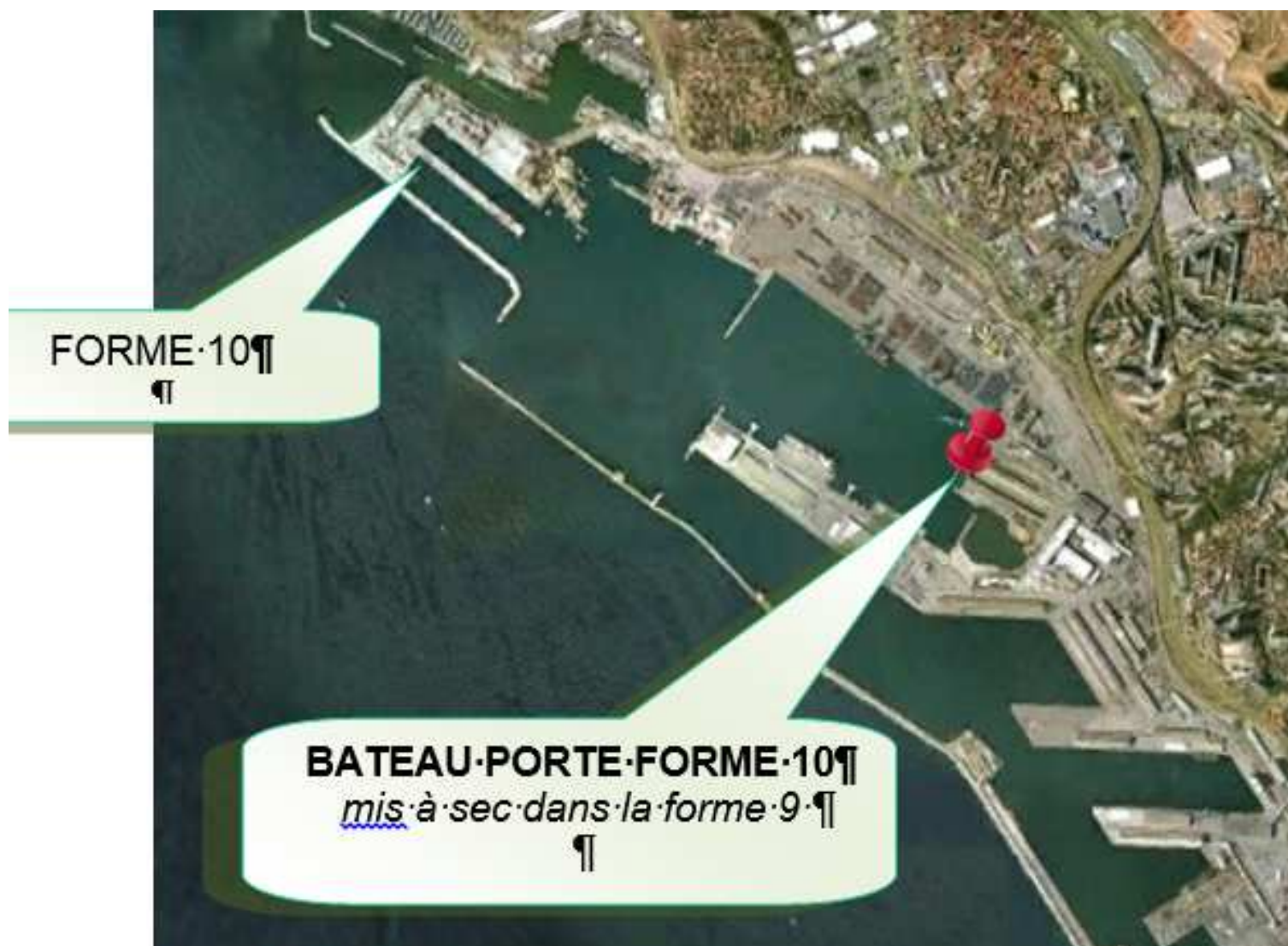




1. Présentation de l'ouvrage









La forme de radoub n° 10 :

Longueur 465 m ; largeur 85 m ; Date de construction : 1972 à 1976

⇒ Un des plus grand ouvrage de ce genre au monde, capable de recevoir des navires de 700 000 à 800 000 t.

Le bateau-porte : Ouvrage en béton précontraint

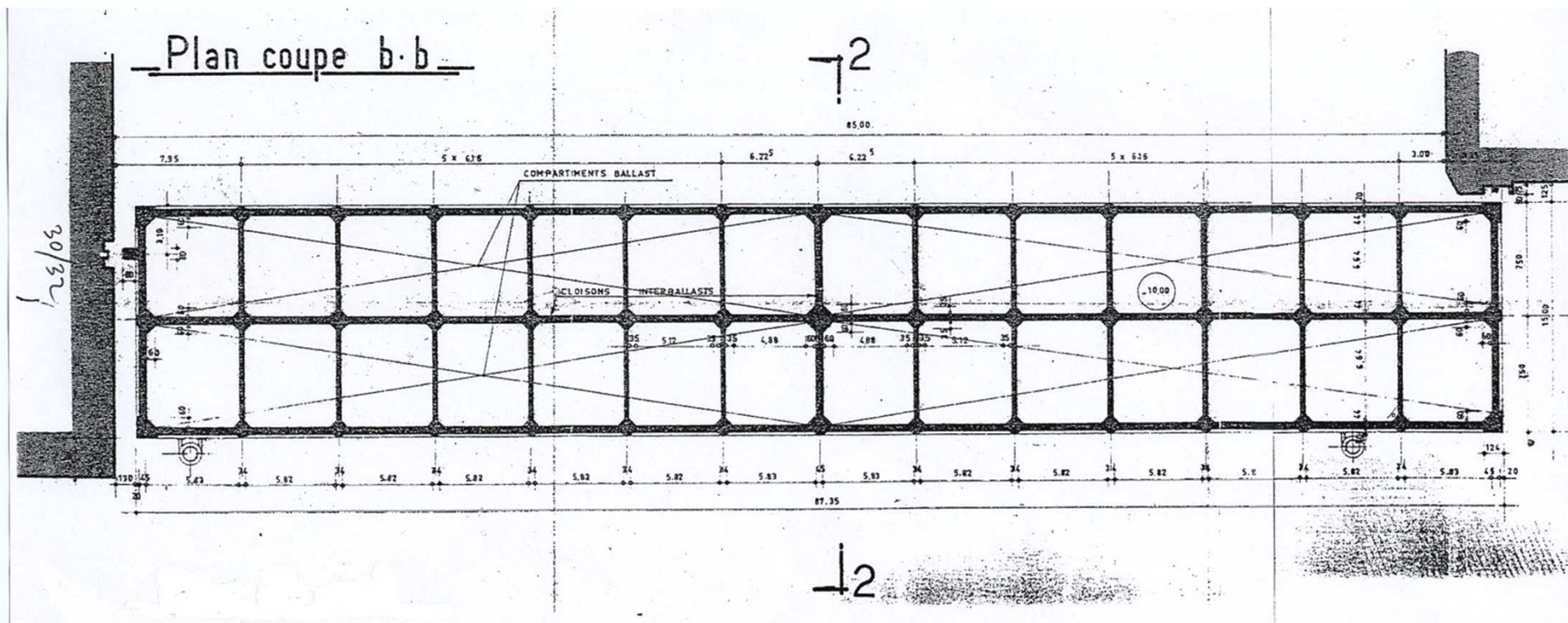
Longueur 87,35 m ; largeur 15 m ; hauteur 13,5 m ; poids : 8 916 t.

Il est constitué en plan de vingt-huit alvéoles identiques de dimensions intérieures 5,82 m x 6,64 m groupées en quatre compartiments de ballast. La précontrainte de la structure est totale, la dalle de fond, les cloisons et le pont supérieur sont précontraints dans deux directions à des taux variant entre 2,7 et 4,0 MPa pour un béton ayant une

 résistance d'environ 30 MPa.

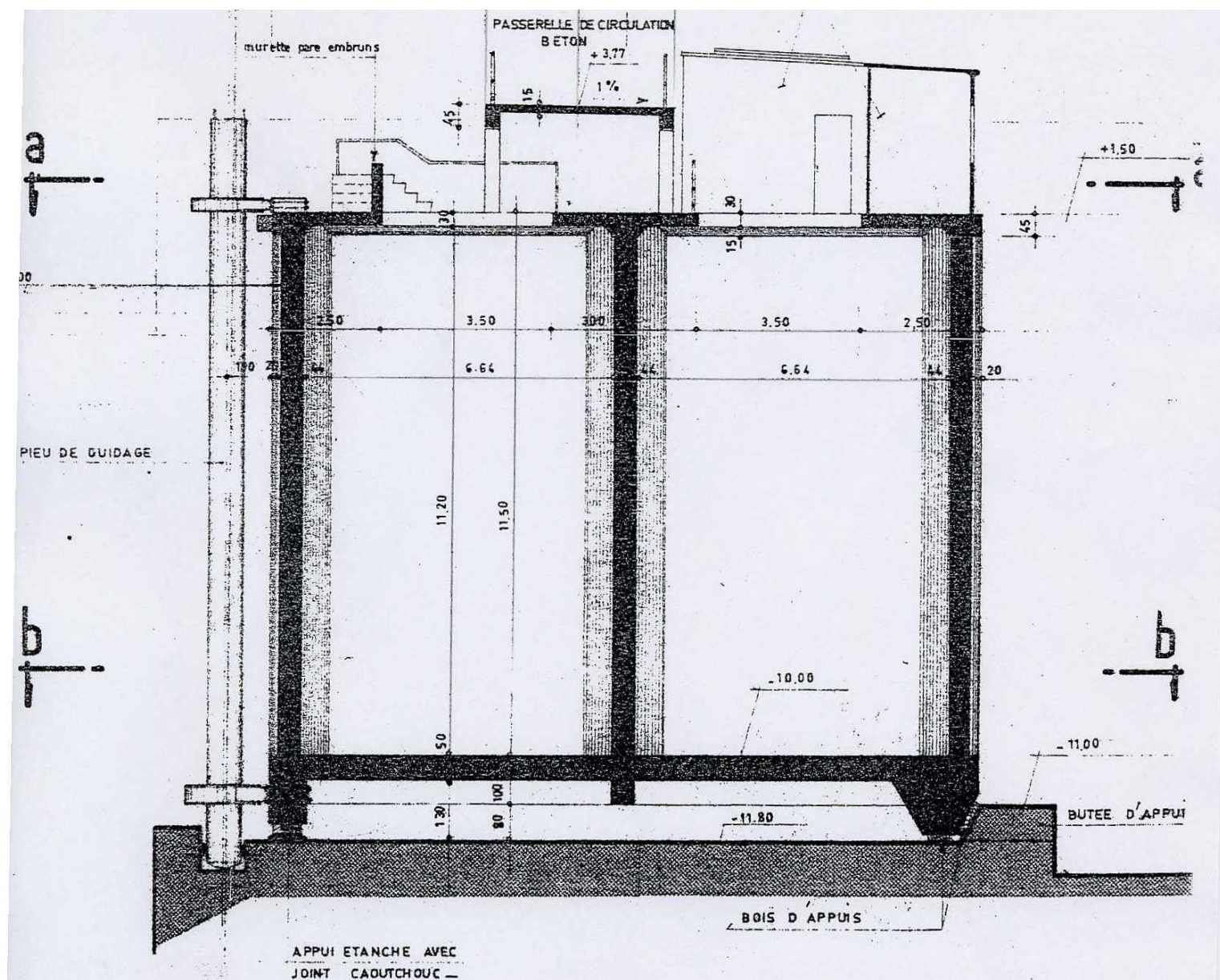


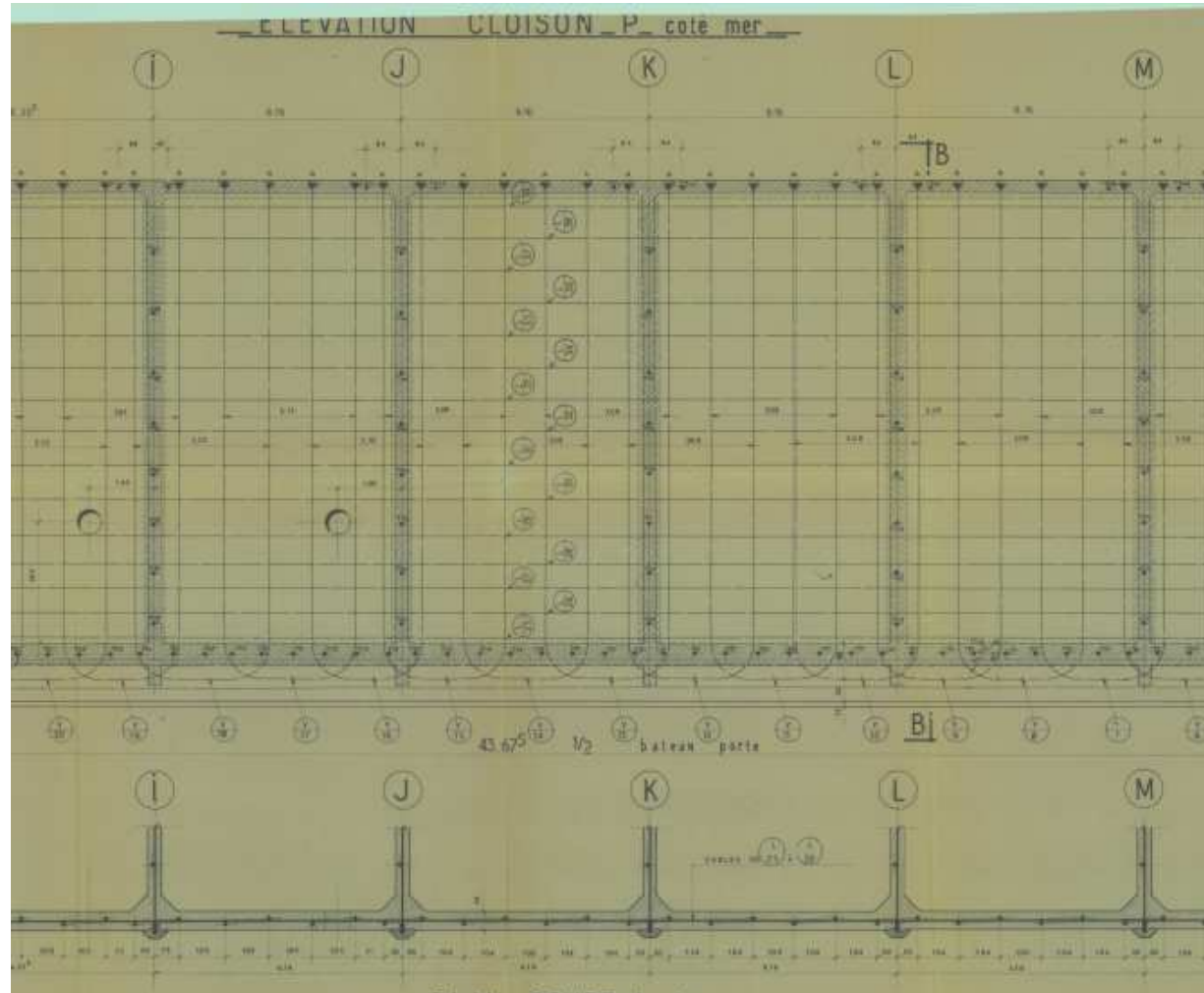




Radier de 50 cm d'épaisseur

4 zones de ballast, chacune divisée en 7 cellules communicantes et séparées par des voiles d'épaisseur 34 ou 44 cm.





Structure précontrainte (voiles et planchers)

câbles 12T13 de classe TBR (procédé STUP),
verticalement par des boucles; horizontalement par des câbles droits



2. Contexte de la mission



ARTICLE 1 - OBJET DU MARCHE

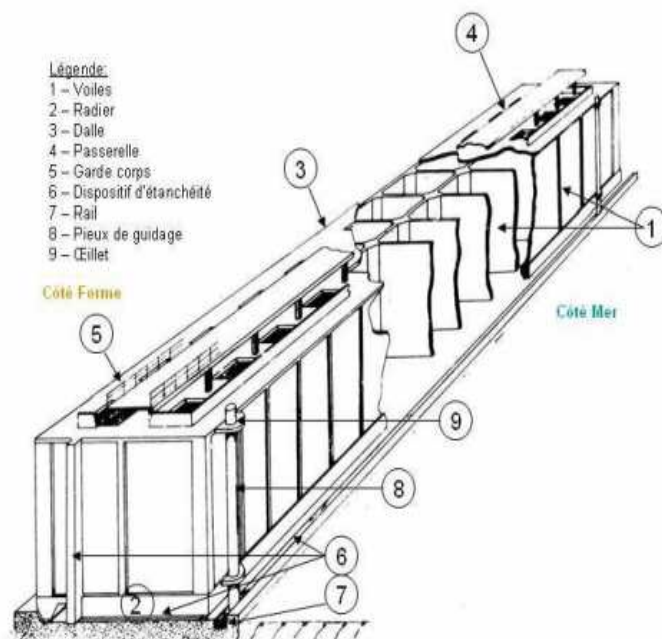
Le présent marché a pour objet :

- de réaliser une inspection détaillée (examen visuel associé à des mesures in situ et sur des échantillons prélevés lors de l'inspection), la prise de clichés par gammagraphie de l'ouvrage et l'ouverture de fenêtres permettant d'actualiser la cartographie et l'intensité des pathologies intéressant les matériaux constituant l'ouvrage (béton, armatures de précontrainte et passives,
- de réexaminer, sur la base de cette expertise, les études de la structure réalisées en 2002, d'en valider les conclusions ou de procéder à de nouvelles vérifications.
- 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 construction, en forme 10, de l'ouvrage destiné à le remplacer.

Le titulaire du marché doit donc associer les compétences d'un bureau d'étude en calcul de structure apte à actualiser les analyses techniques et de risques à celle d'un laboratoire spécialisé en pathologie des matériaux (béton armé et précontraint) capable d'établir un diagnostic servant de base aux calculs de structure.

Historique des travaux et investigations :

DATE DE CONSTRUCTION	: Entre octobre 1973 et août 1974
ENTREPRISE CONSTRUCTRICE	: Groupement de cinq entreprises (Compagnie Française d'Entreprises, GTM Travaux Publics, SFTP Fougerolle, Européenne d'Entreprises, Société Général d'Entreprises)
TRAVAUX D'ENTRETIEN RÉALISÉS	: 1979 : Peinture et ragréage : notamment dans les caissons et sur le parement côté forme
TRAVAUX DE RÉPARATION RÉALISÉS	: 2000 : Réparation des parements



1978 : Gammagraphie (contrôle de l'injection de 44 câbles)

1986 : Inspections visuelles (parements extérieurs du bateau-porte en position échouée)

Ultrasons (pour estimer localement la profondeur d'une fissure)

1991 : Ouverture de 17 fenêtres d'observation et inspections visuelles

1997 : Inspections visuelles du CEBTP des 17 et 18 mars 1997 (bateau-porte mis en cale sèche, suite à une avarie ayant provoquée la section de 3 câbles de précontrainte)

2000 : Inspections visuelles du LERM des 23 mai et 25 août 2000

Réflectométrie radar et pachomètre

Mesure de potentiels (sur les bandeaux et sur la dalle, sur la passerelle, et sur la face inférieure du radier)

Carottages (10 prélèvements sur les faces émergées du bateau-porte en position échouée, et 4 sur le bas du parement côté mer et sur les sous caissons lors de la mise en cale sèche) et mesures des teneurs en ions chlorures et sulfates, mesure de la carbonatation

Examen au MEB

Réflectométrie RIMT2 sur 24 câbles (Rapport CEBTP du 12 octobre 2000)

2001 : Inspections visuelles partielles (sous radier, parement côté forme + vidange partielle des caissons) (Rapport de diagnostic du CEBTP du 9 juillet 2001)

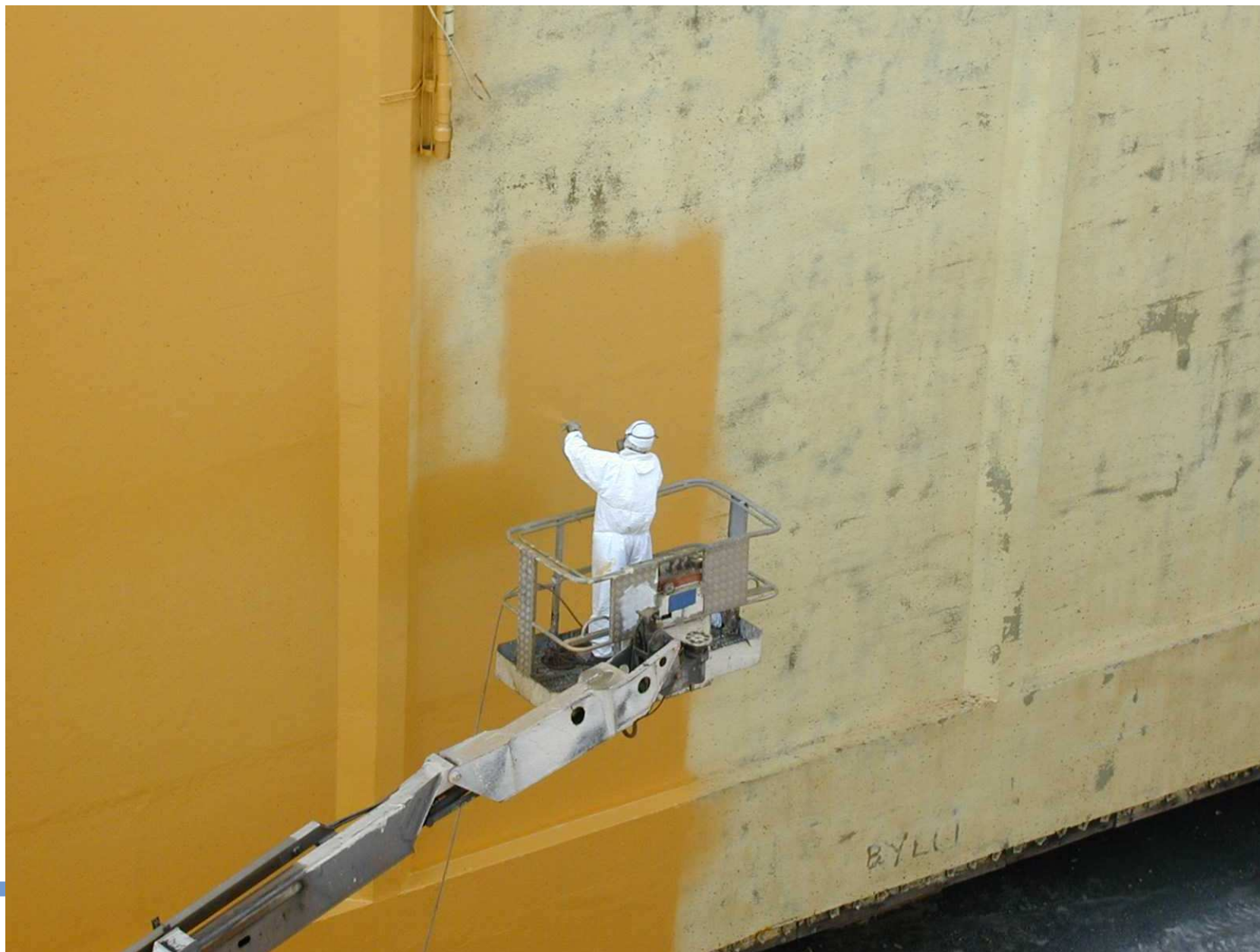
Ouverture de 11 fenêtres d'observation : inspections visuelles et essais sur échantillonnage, mesures de teneur chlorures et sulfates

Réflectométrie RIMT2 sur 43 câbles (11 câbles longitudinaux, 7 verticaux, 19 transversaux en paroi et 6 transversaux en radier)

2002 : Réflectométrie RIMT2 sur 42 câbles (Rapport SIPRETEC du 28 février 2003)

2004 : Inspections visuelles de la paroi coté forme et de la sous face du radier, Réflectométrie RIMT2 sur 44 câbles (Rapport CEBTP du 30 juin 2004)







3. Inspection détaillée

DIADES





Juillet-Septembre 2012

Interventions:

Mise à sec du bateau porte dans la forme n° 9 pendant 4 semaines du 30 juillet au 23 août 2012.

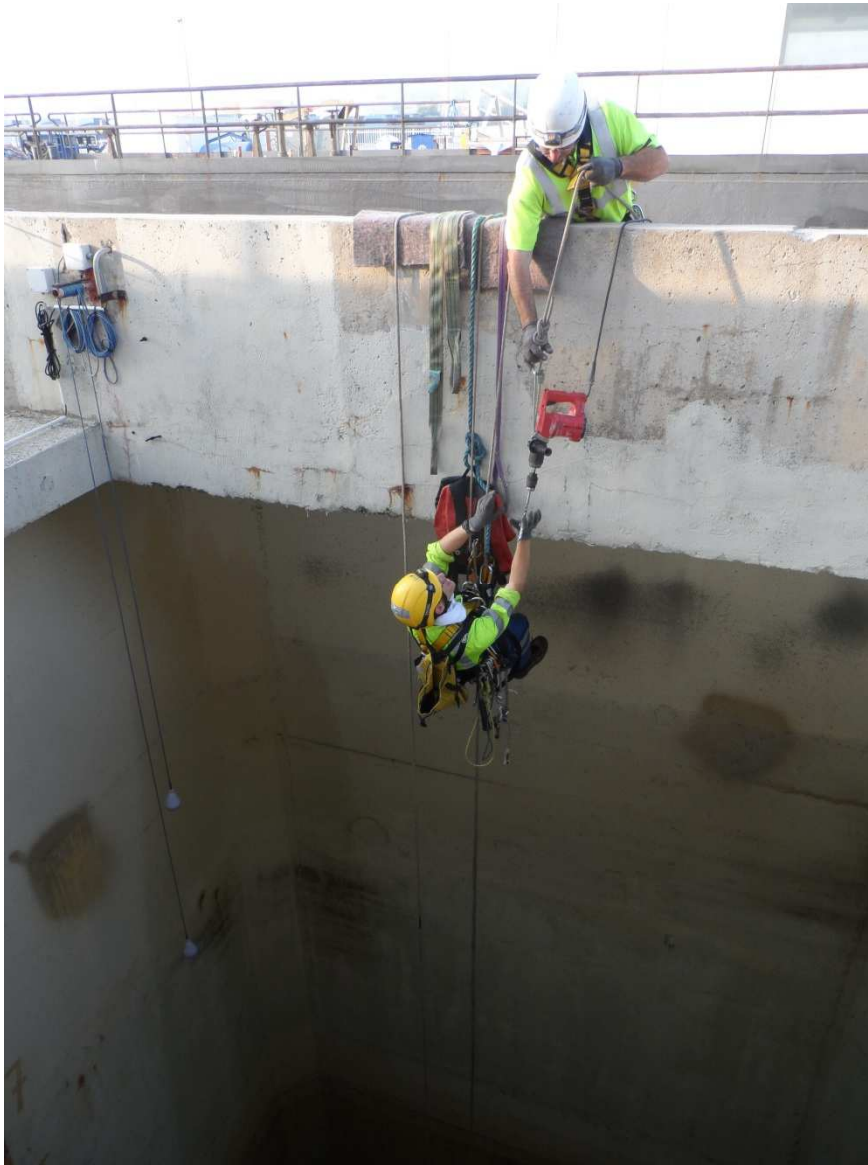
Missions de DIADES :

- 0 analyse pathologique et synthèse du dossier d'ouvrage,
- 0 synthèse des investigations et gammagraphies antérieures,
- 0 définition du programme d'investigations, avec implantation des reconnaissances complémentaires (gammagraphies, fenêtres, arbalète, carottages, chlorures,...),
- 0 définition des conditions, logistique et moyens d'intervention,
- 0 pilotage des investigations in situ,
- 0 Inspection détaillée de toute la structure, avec cartographies des désordres,

Nettoyage préalable:

Le Grand Port Maritime de Marseille s'est chargé de faire nettoyer les parements extérieurs de la structure pour l'exfoliation de divers dépôts marins (algues, coquillages, moules...). Ce nettoyage a permis d'avoir une meilleure visibilité de l'état des parements et une surface propre pour les différentes investigations complémentaires

Conditions d'intervention :



inspection par cordistes



Inspection détaillée depuis la passerelle positive



CAISSONS : Eclats de béton avec aciers apparents corrodés en tête du caisson A1



CAISSONS : Eclats de béton en formation et éclats de béton avec acier apparent foisonné sur le parement côté mer du caisson F1



CÔTE FORME : Corrosion importante accompagné de coulure de rouille du boulonnage de l'amortisseur d'accostage



CÔTE FORME : Fissuration verticale accompagnée de coulure rouille sur le voile entre les files D et E

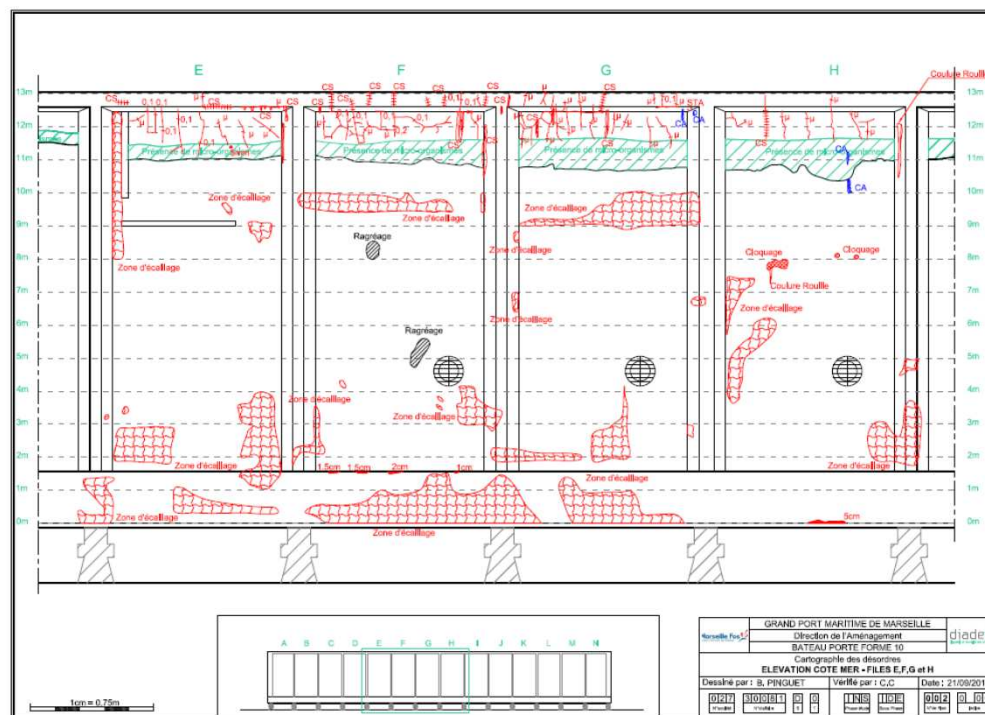
Inspection détaillée



FACADE SUD : Foisonnement important des amortisseurs d'accostage

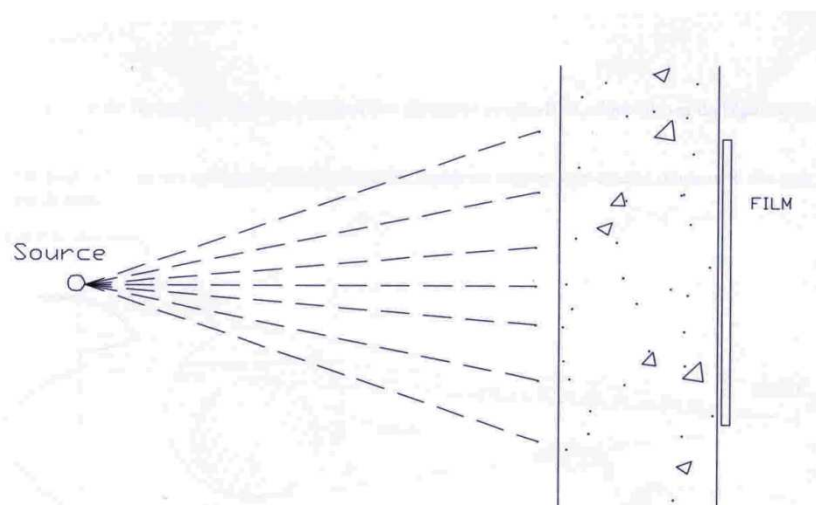


FACADE SUD : Eclats de béton avec aciers apparents corrodés en tête du dispositif d'étanchéité vertical

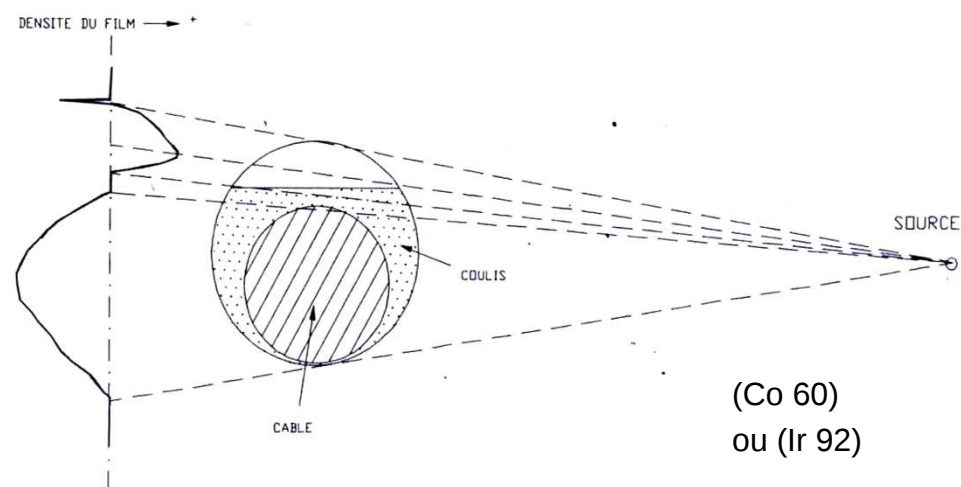
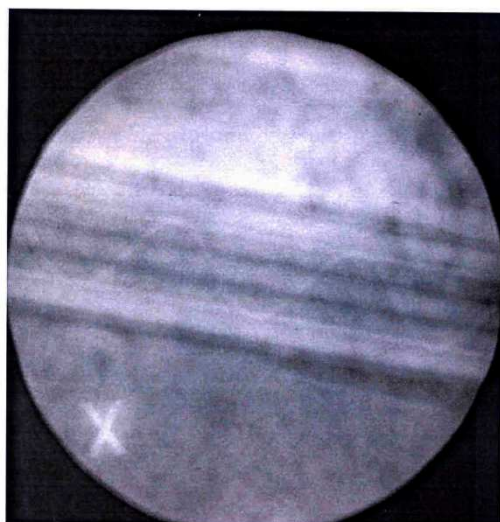


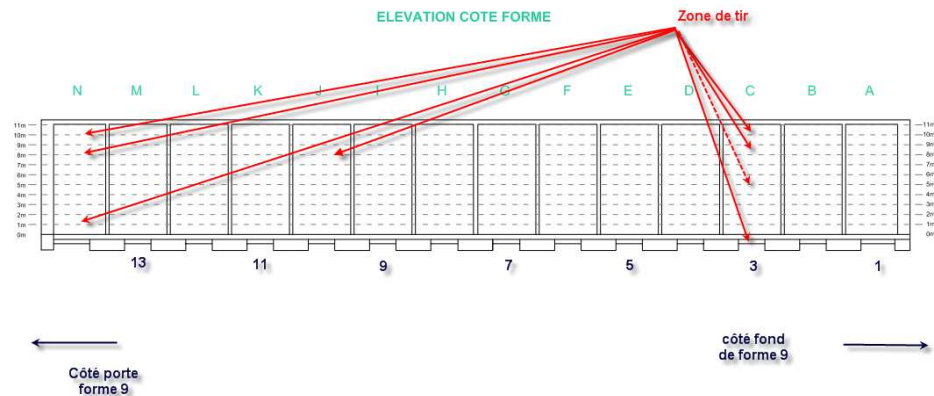
46 plans de cartographies développées des désordres de toutes les faces de la structure

Test de Gammagraphie

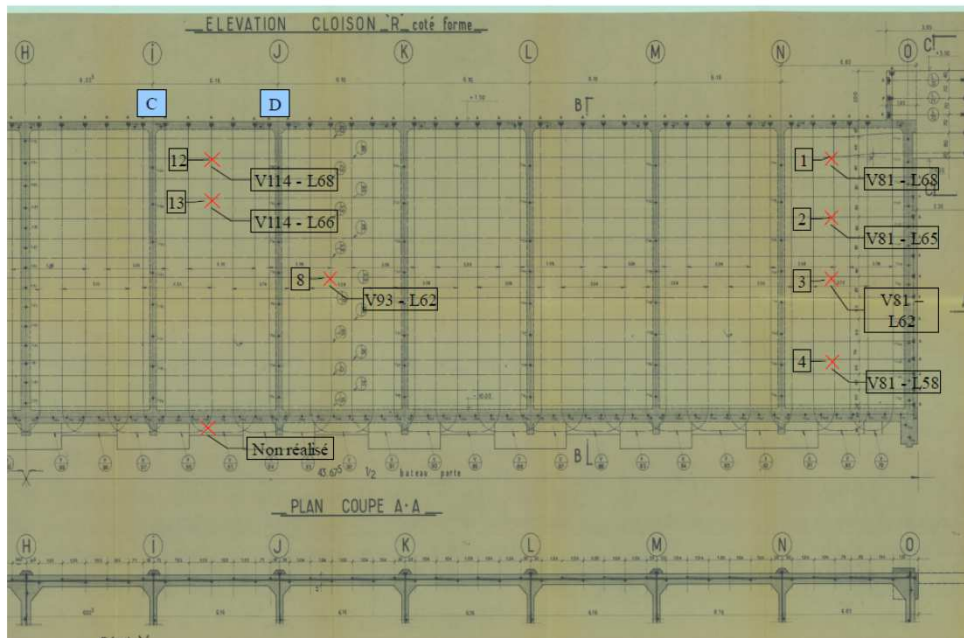


Film n°4





Grand Port Maritime de Marseille	diade
Département AMCE	
BATEAU PORTE FORME 10	
Elevation pour implantation contradictoire lors de la prévalite du 30 Juillet 2012	
Dessiné par : B. PINGUET	Vérifié par : C.C. Date : 30/07/20
0217 022224 0 0	0000 0 0



Programme :

Déterminé par la société DIADES, en fonction des résultats obtenus lors des précédentes campagnes d'auscultation réalisées entre 1979 et 2000 et des possibilités d'accès dans les caissons.

Précontrainte :

Câbles verticaux, longitudinaux et transversaux.
Procédé STUP avec câbles 12 T 13 (Ancrages actifs STUP 199 et passif SEEE FU 12500).

Source-film :

L'épaisseur des âmes des caissons est de 50 cm nécessitant l'emploi d'un support sensible rapide (résolution de 100 µm) et le choix d'une distance source-film de 90 cm permettant de limiter le temps d'exposition à 35 minutes pour une bonne qualité d'image.

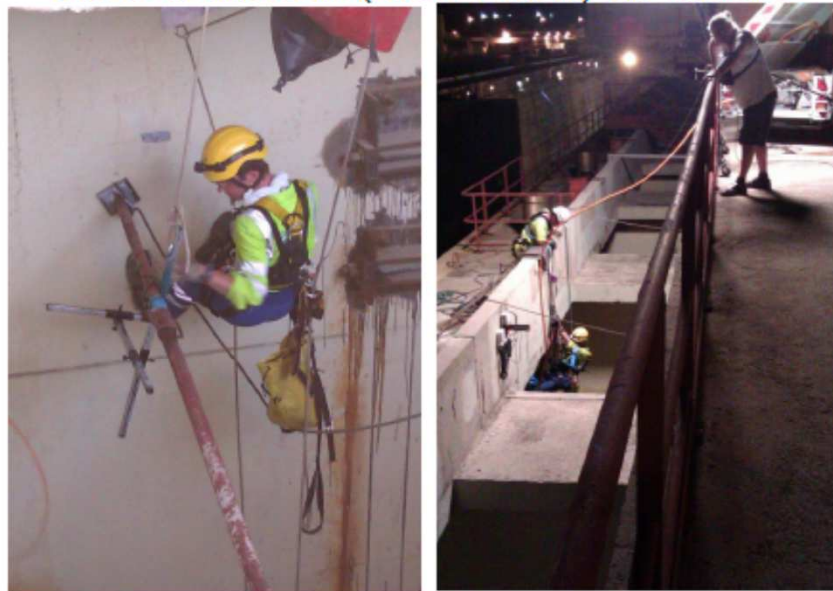
Matériel :

Projecteur : GMA 2500
Radioélément utilisé : Cobalt 60 ; Activité : 2,86 TBq en début août 2012.
Films numériques utilisés : écrans photostimulables au phosphore ayant une résolution de 100 µm (KODAK).
Distance source/film : 0,90 m
L'extraction du radiogramme (1) par lecture laser et sa validation sont faits dans un fourgon à proximité du site.
Moyen d'accès aux parois à ausculter : nacelle élévatrice ciseaux à l'extérieur et cordes à l'intérieur.

Conteneur de la source de cobalt 60



Vue côté émetteur (radioélément) sur chantier



Vue côté film sur chantier

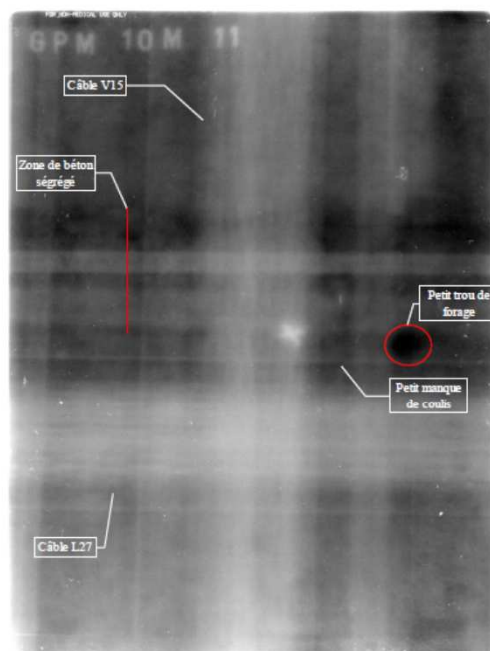


Installation de traitement des radiogrammes

Scanner et écran de lecture



Radiogramme n° 11



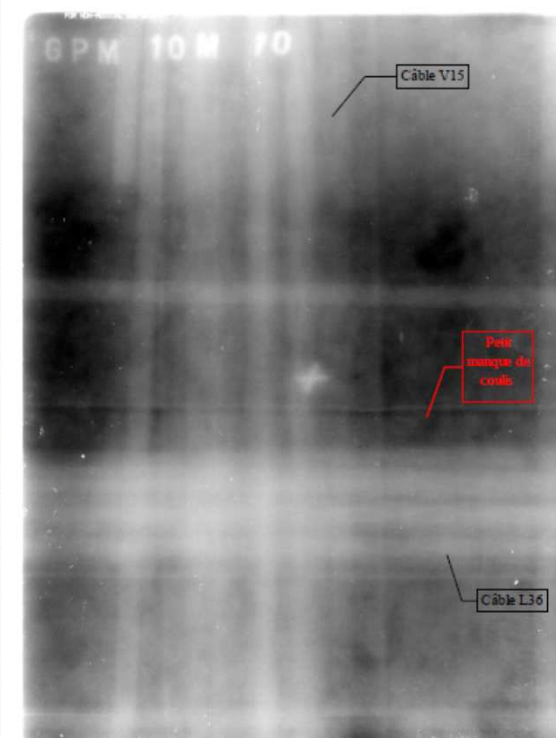
Conclusions CETE de Lyon :

Les 13 radiogrammes obtenus ont permis d'observer 5 câbles verticaux (V3 – V15 - V81 – V93 – V114) à différentes hauteurs et 10 câbles longitudinaux (L27 – L35 – L36 – L37 – L38 – L58 – L62 – L65 – L66 – L68) dont deux en deux points.

Nous n'avons observé aucun défaut significatif de remplissage des conduits en dehors de deux très petits vides (câbles L27 et L 36) en haut de conduit (2 à 3 mm). Ces manques, qui ne touchent pas les torons de précontrainte, ne justifient pas une ouverture de fenêtre spécifique.

Radiogramme N°	Cais-son	Câbles	POS en cm	A	B	C	D	Autres défauts	OBSERVATIONS
01 *	14 côté forme	V81	-1,5	x					Variation d'épaisseur du béton (zone de réparation antérieure)
		L68	-1,5	x					
02	14 côté forme	V81	-2	x					RAS
		L65	0	x					RAS
03	14 côté forme	V81	-1,5	x					RAS
		L62	-6	x					RAS
		V81	0	x					RAS
04	14 côté forme	L58							Câble non visible sur le radiogramme (erreur de positionnement de la source et du film : 30 cm trop bas).
05	14 côté mer	V3	-10,5	x					RAS
		L37	-11,5	x					RAS
06	14 côté mer	V3	-3,5	x					RAS
		L35	-7	x					RAS
		V3	+7,5	x					RAS
07 *	14 côté mer	L27	-5,5	x				x	RAS pour le câble. Présence d'un trou foré dans le béton, au niveau du câble, avec vraisemblablement une armature métallique scellée dans ce trou.
08	10 côté forme	V93	-4,5	x					RAS
		L62	-3,5	x					RAS
09	10 côté mer	V15	+8,5	x					RAS
		L38	-1	x					RAS
		V15	-1,5	x					RAS
10 *	10 côté mer	L36	-4,5	x	x				Très petit filet de vide en haut de conduit (3mm), sans contact avec le câble.
		V15	-2	x					RAS
11 *	10 côté mer	L27	-4	x				x	Sans doute un très mince filet de vide en haut du conduit (2mm), sans contact avec le câble. Présence d'une ségrégation de béton à 5 ou 7 cm au dessus du câble horizontal. Présence vraisemblable d'un petit trou foré juste au dessus de câble horizontal.

Radiogramme n° 10





4. Examen de la précontrainte et analyses en laboratoire

LERM





Inspection et diagnostic de l'état du bateau-porte de la forme 10. Grand Port Maritime de Marseille (13)

Juillet-Septembre 2012
Affaire 032 30081

Missions du LERM :

- réalisation de fenêtres suite à la campagne de gammagraphie
- examen de la gaine, du coulis et des armatures de précontrainte
- mesure de la tension résiduelle par essai à l'arbalète
- réalisation de carottages non traversant pour analyses en laboratoire (profils de concentration en chlorures totaux, résistance mécanique en compression)
- rebouchage des ouvertures et des sondages.

Tir d'arbalète

Mesures de la tension résiduelle des fils de précontrainte par l'essai à l'arbalète, encadré par le guide technique du LCPC « Mesure de la tension des armatures de précontrainte à l'aide de l'arbalète » de novembre 2009. 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, tel qu'illustré sur le schéma ci-dessous.

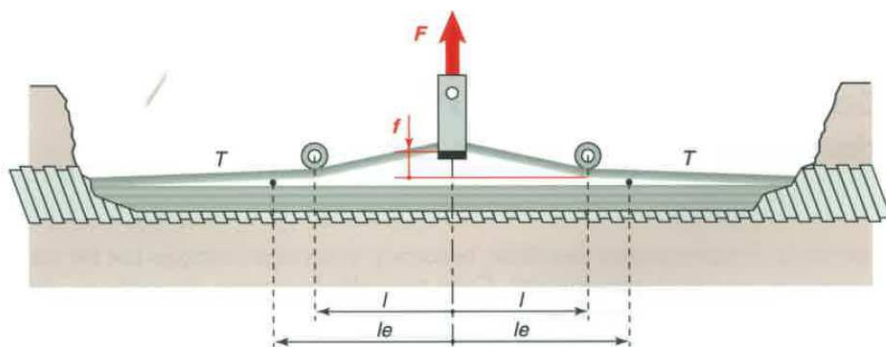
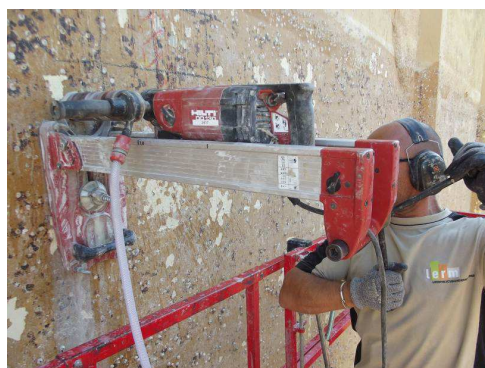
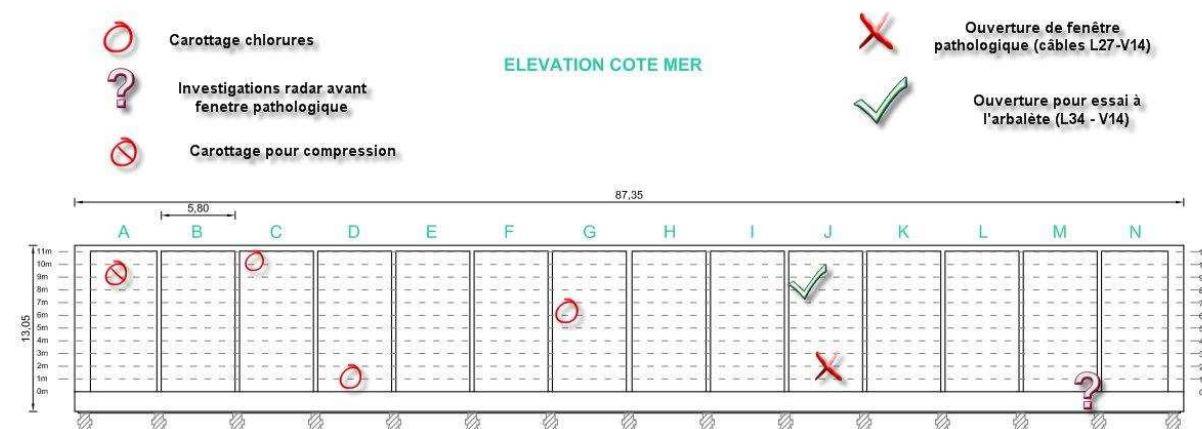
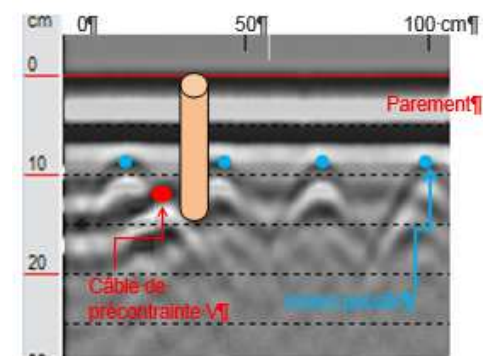
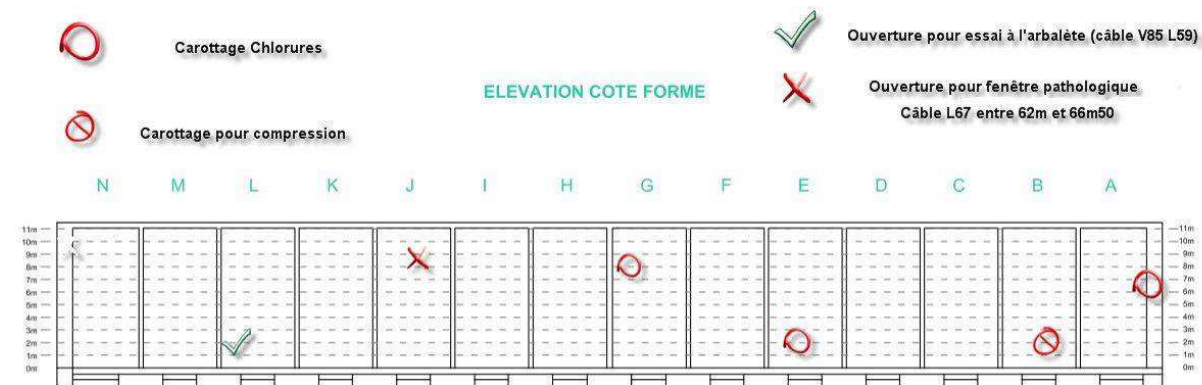


Fig. 8 : Schéma de principe du fonctionnement de l'arbalète





Etude de la précontrainte / Résultats

- 4 fenêtres réalisées
- aucune anomalie de remplissage. Léger enrouillement du conduit intérieur de F1 et piqûres sur fils
- tension moyenne mesurée sur 2 fenêtres : **130,8 kN/toron**
- contrainte résiduelle moyenne : **1406 MPa**



Etude des bétons / Résultats

- 8 sondages carottés
- résistance mécanique en compression:
 - 52,5 MPa côté Forme
 - 58,8 MPa côté Mer



Etude des bétons / Résultats

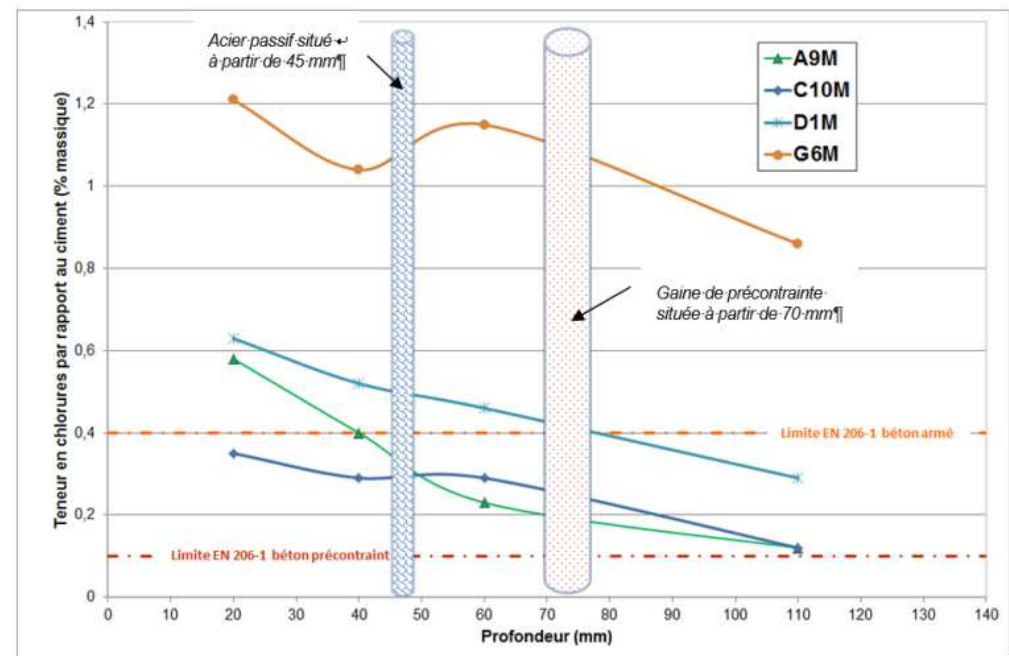


o teneurs en chlorures :

Les chlorures totaux ont été déterminés par potentiométrie après attaque acide ménagée : ils ont été dosés dans les bétons provenant des côtés Forme et Mer, à plusieurs profondeurs (10/25 ; 30/45 ; 50/65 et 100/115 mm), afin de mettre en évidence leur profondeur de 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 actuellement en vigueur.

- o Teneurs en chlorures très élevées et supérieures aux spécifications en vigueur, et ce jusqu'à 115 mm
- o enrobage minimal des aciers passifs : 45 mm
- o enrobage minimal des gaines : 70 mm
- o concentrations plus élevées côté Forme que côté Mer : cycle d'humidité/séchage



Détermination du PH du coulis

Le pH du coulis a également été 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. La mesure a été réalisée conformément aux paragraphes 6.3.2, 6.5 et 7.3 de la norme XP P 18-458 de novembre 2008.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après.

Réf. LERM	N° de sondage / Fenêtre	N° Caisson	pH	OH^-	Cl^-	Cl^-/OH^-
30081-9	F1, câble V13 près du cliché 10	J	12,41	0,218	0,01	0,04

Tableau 9 : Mesures du pH et calcul du rapport Cl^-/OH^- de l'échantillon de coulis

L'observation de ces résultats montre 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.



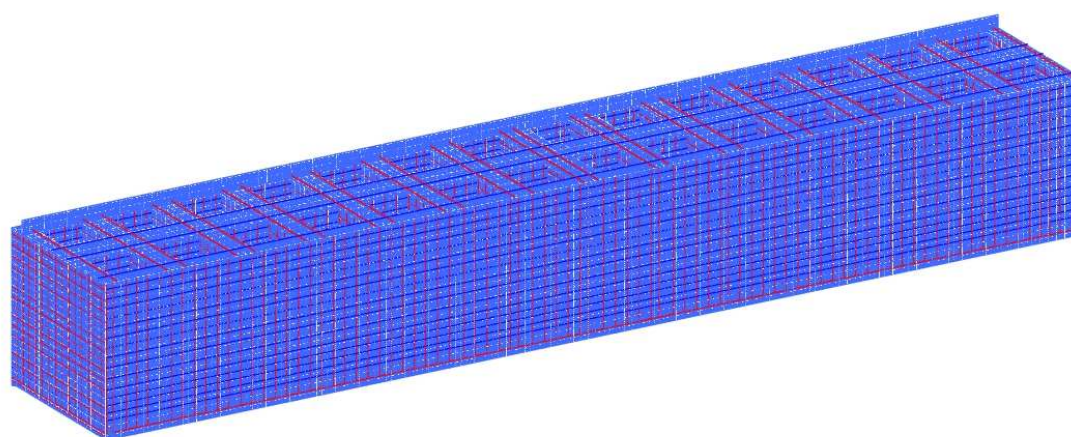


5. Expertise de la structure

SETEC TPI



Calcul de l'ouvrage effectué à partir d'un modèle aux éléments finis réalisé à l'aide du logiciel PYTHAGORE, permettant de modéliser l'ensemble du bateau porte et sa précontrainte :



Hypothèses du calcul

- Règlements : Le bateau porte calculé à l'époque de sa construction (1973-1974) suivant les règles du CCBA 68 et de l'instruction provisoire IP1 sera vérifié en considérant la réglementation actuelle (EUROCODE 2 et BPEL 99)
- Béton : résistance caractéristique à la compression du béton de : $f_{ckj} = 40 \text{ Mpa}$ valeur conservative par rapport aux résultats des essais du LERM (55 Mpa) mais supérieure au dimensionnement d'origine : $\sigma_{28} = 30 \text{ Mpa}$.
- Précontrainte : les câbles seront modélisés sans diminution de section, avec la précontrainte théorique après pertes différées : $115 \text{ kN} < P < 120 \text{ kN /toron}$ valeur conservative par rapport aux résultats des essais d'arbalète $P = 130 \text{ kN /toron}$ Soit $P \approx 0,79 \times P_{init}$
- Aciers passifs : Les aciers passifs sont constitués de barres HA en aciers écroui de diamètre $\leq 20 \text{ mm}$. Limite d'élasticité nominale à la traction : $\sigma_{eg} = 400 \text{ MPa}$ Soit une limite conventionnelle d'élasticité à 0.2 % d'allongement.



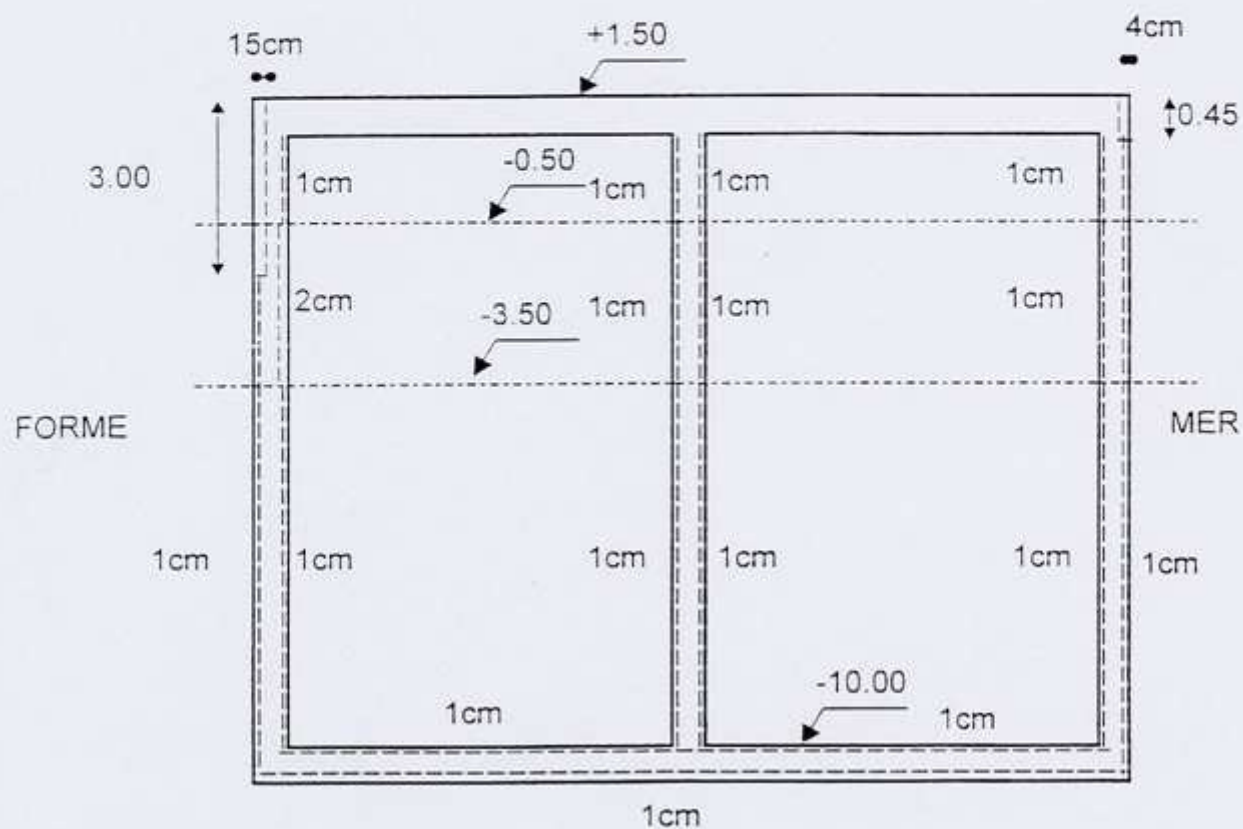
Hypothèses du calcul

Géométrie de l'ouvrage; réduction des épaisseurs (béton & aciers passifs) :

- Les calculs de vérification de la structure sont été 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 2000 n'est pas pris en compte dans les sections de calcul
- le béton de réparation (mortier prêt à l'emploi) mis en œuvre lors de la réparation de 1991 n'est pas pris en compte dans les sections de calcul.
- la section des armatures passives est réduite pour tenir compte de la corrosion. La réduction de la section augmente avec la diminution de l'épaisseur du béton d'enrobage de la zone concernée, de manière proportionnelle à la diminution d'épaisseur du béton.
 - pour $d=0\text{cm}$ ----->100 % de section d'armatures effectives
 - pour $d=3\text{cm}$ ----->0 % de section d'armatures effectives (en supposant que le nu extérieur de la première nappe d'armatures est à 3 cm)



REDUCTION DES EPAISSEURS DE BETON



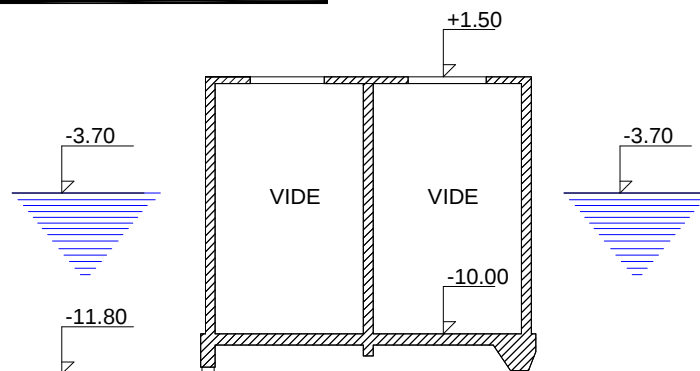


Cas de chargement :

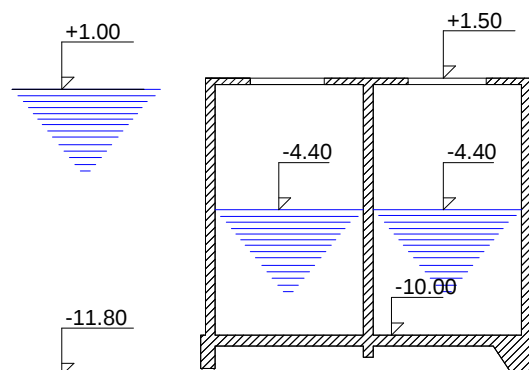
SITUATION NORMALE

VERIFICATION ELS RARE
FREQUENT
QUASI- PERMANENT

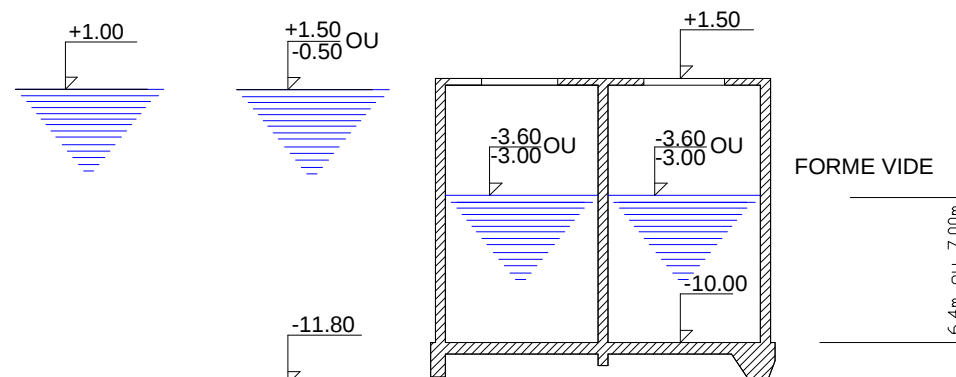
a1 -FLOTTAISON LEGE



a2 -FLOTTAISON A L' ECHOUAGE



a3 -BATEAU SUR APPUIS

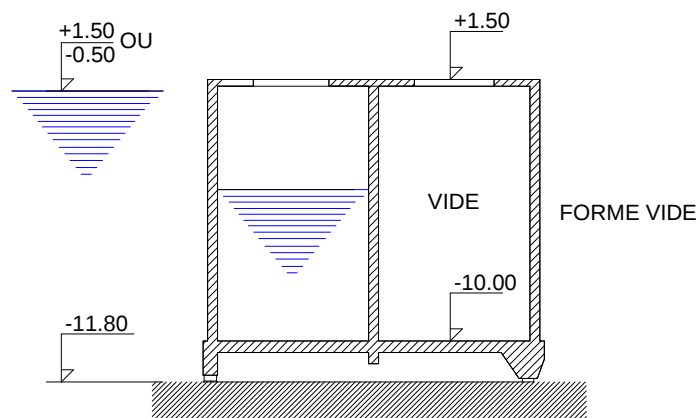
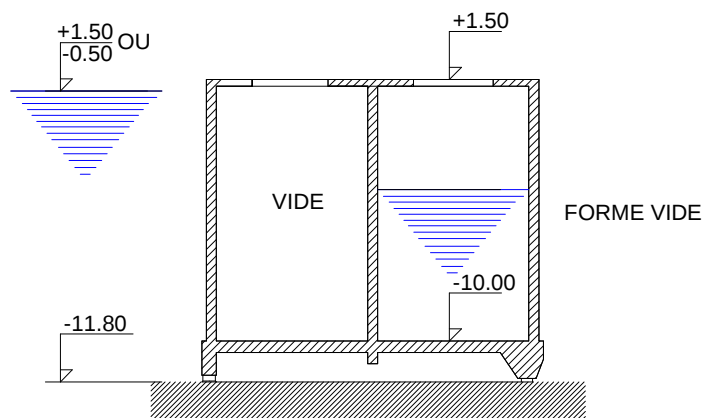


SITUATION EXCEPTIONNELLE

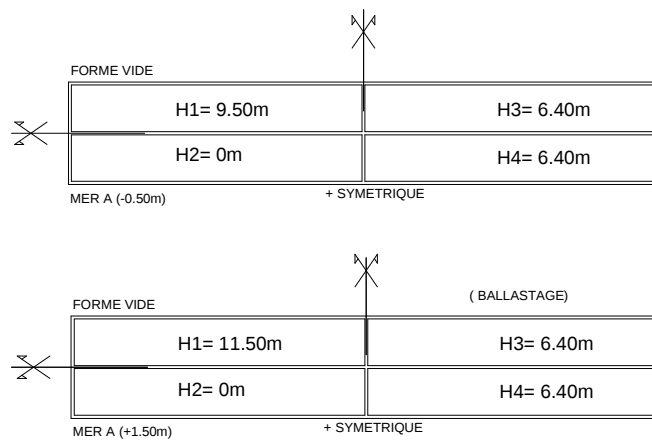
A

VIDANGE D' UN COMPARTIMENT DE BALLASTAGE

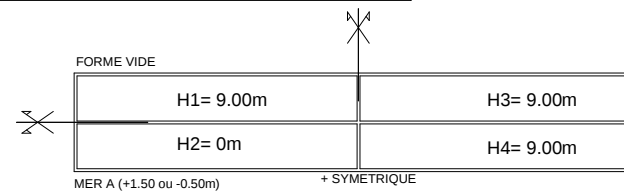
VERIFICATION ELS RARE



REMPLISSAGE TOTAL DES COMPARTIMENTS ADJACENTS



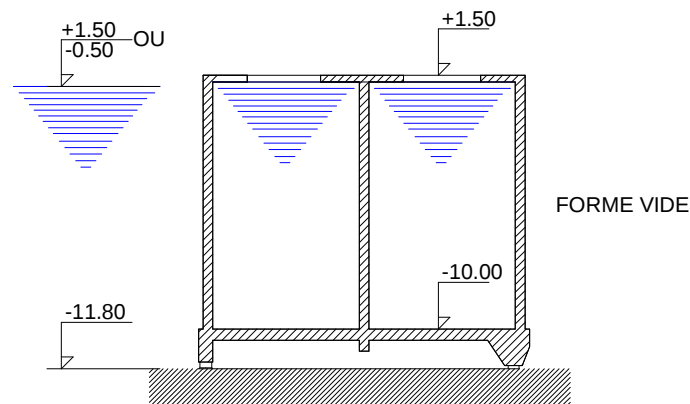
REMPLISSAGE CONSTANT DANS LES AUTRES COMPARTIMENTS



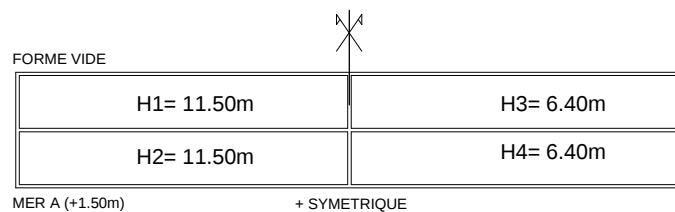
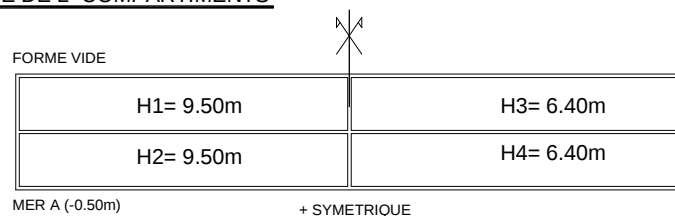
SITUATION EXCEPTIONNELLE

B

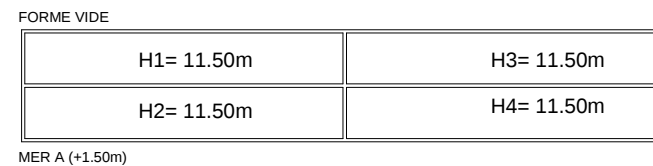
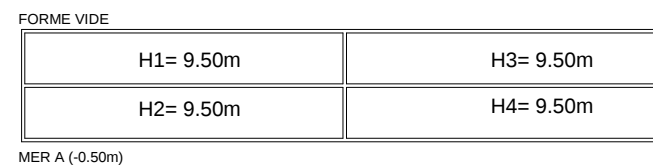
REPLISSAGE TOTAL DES COMPARTIMENTS DE BALLASTAGE
(mauvais fonctionnement des appareillage ou accident)



REPLISSAGE DE 2 COMPARTIMENTS



REPLISSAGE DE 4 COMPARTIMENTS

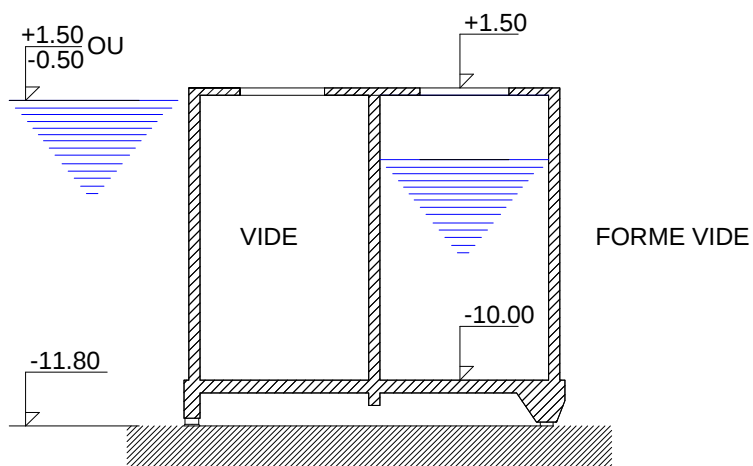




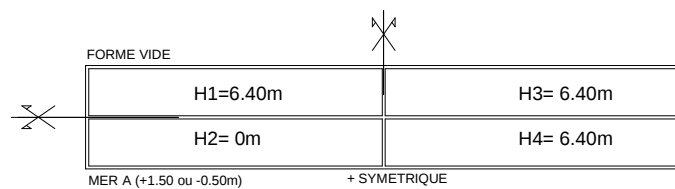
SITUATION EXCEPTIONNELLE

C

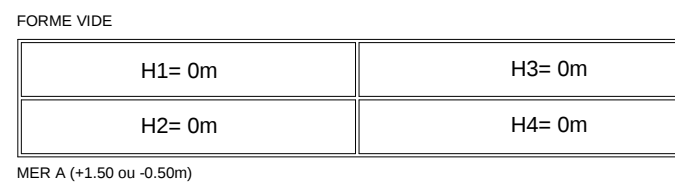
VIDANGE TOTAL DE 1-2 OU 4 COMPARTIMENT DE BALLASTAGES



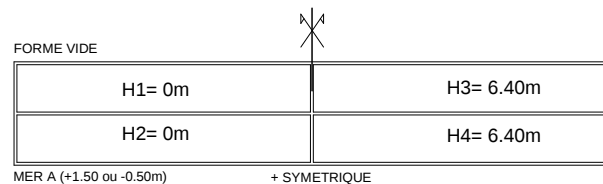
VIDANGE D' UN COMPARTIMENT



REPLISSAGE DE 4 COMPARTIMENTS



REPLISSAGE DE 2 COMPARTIMENTS



Type Vérification	G	P	Marnage	Ballast	Cas
ELS caractéristique	1	1	-0.5 / 1.5	Normal	A1 à A4 AS1 à AS2
ELS fréquent	1	1	-0.3 / 0.9	Normal	A3 à A4 (*) AS1 à AS2 (*)
ELS quasi-permanente	1	1	0.0	Normal	A3 (*) AS1 (*)
ELS caractéristique	1	1	-0.5 / 1.5	Exceptionnel	B et B'
ELU	1	1	-0.5 / 1.5	Exceptionnel	B et B'

- Etats limites ultimes :

On vérifie l'ouvrage à la rupture sous combinaison exceptionnelle. Pour chaque partie de l'ouvrage (dalles et voiles), on établit les diagrammes de contraintes enveloppes calculées en section homogènes. Pour les zones significatives ou les contraintes dépassent $f_{ctm} = 3.5 \text{ MPa}$ (pour un béton de classe $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$), un calcul à la rupture est mené à partir des sollicitations concomitantes.

- Etats limites de service:

On vérifie les critères de service de l'ouvrage aux eurocodes (limitation des contraintes et maîtrise de la fissuration).

ELS caractéristique : $\sigma_c < 0.6 \cdot f_{ck} = 24 \text{ MPa}$; $\sigma_s < 0.8 \cdot f_{yk} = 320 \text{ MPa}$

ELS fréquent : Non décompression

ELS quasi-permanent : $\sigma_c < 0.45 \cdot f_{ck} = 18 \text{ MPa}$

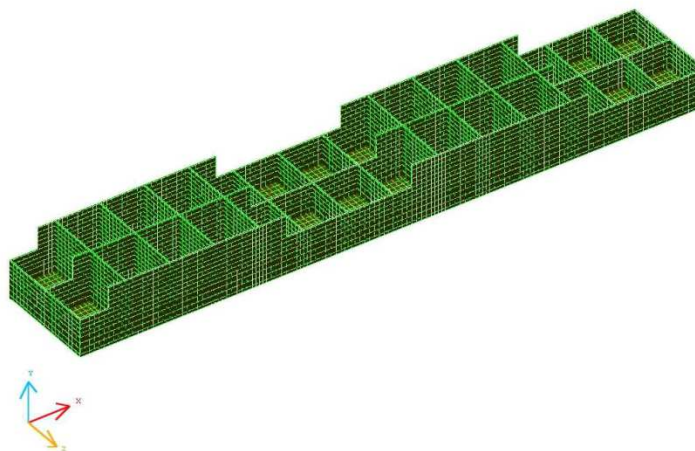
- Pas de cas de charge accidentel

La modélisation prend en compte le phasage des éléments de construction.

En particulier, on respecte les hypothèses suivantes :

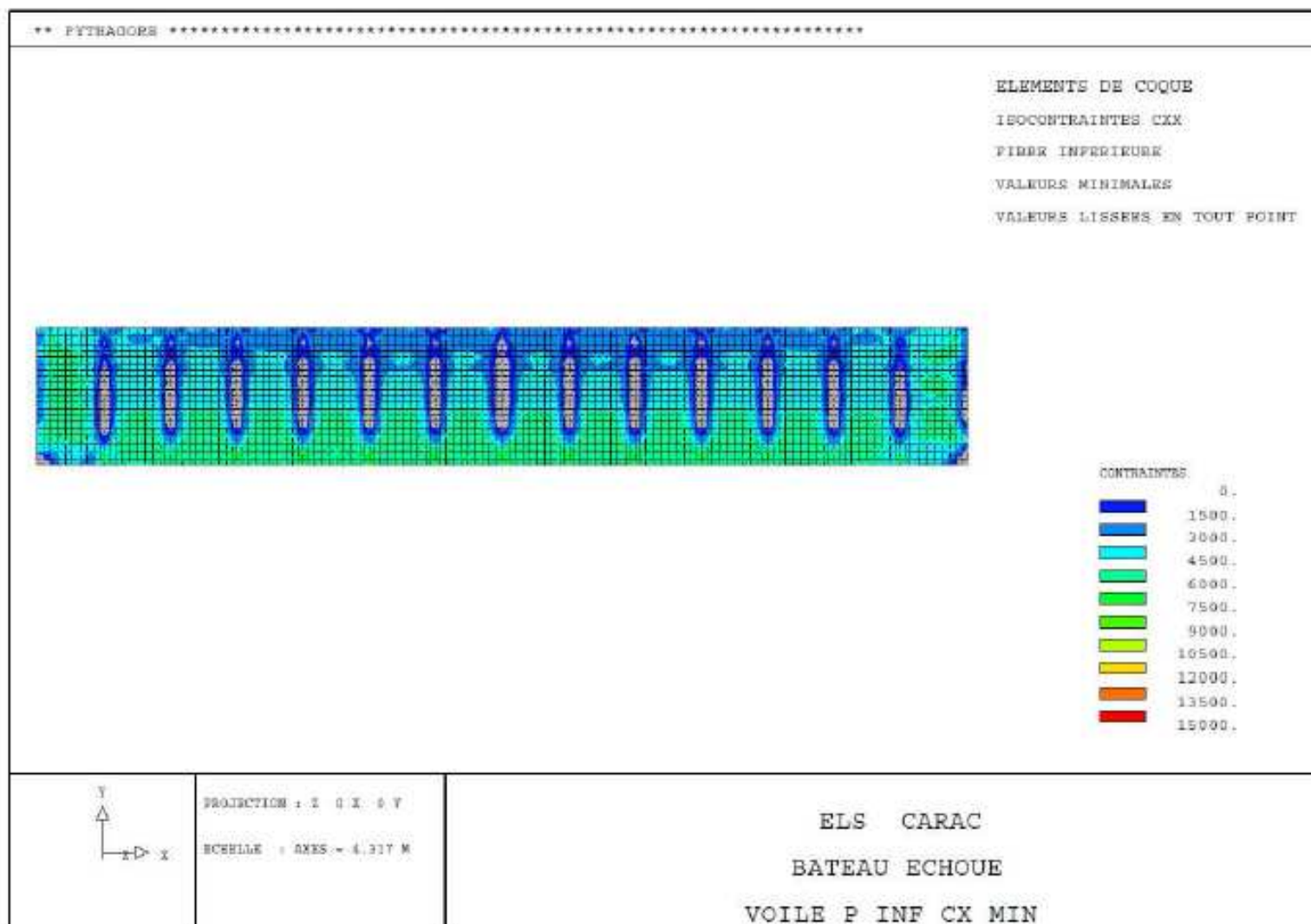
- coulage des éléments en damier horizontalement (4 phases)
- coulage du radier puis 5 levées successives
- démarrage du coulage le 1er janvier 1974 ; 1 mois pour chaque levée
- 6 mois entre le coulage du premier élément de radier et du dernier élément de la levée 5

LEVÉE 3 PHASE 2



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 1er janvier 2013 sont ensuite calculés par le logiciel de calcul.



Conclusions :

- L'ouvrage ne respecte donc 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 du béton à l'ELS fréquent.
- Pas de risque de ruine de l'ouvrage, même dans les situations exceptionnelles de ballastage qui ont été étudiées.
- On peut conclure que l'ouvrage actuel est apte à assurer à court terme, la fermeture de la forme 10 pendant le temps de construction du nouveau bateau-porte.



FIN

