

Rapport technique - Phase PRO

LA ROCHELLE / Tour Saint Nicolas – Travaux de consolidation d'urgence

Volet structurel

Affaire n° 17-027



Maître d'œuvre

Olivier SALMON, ACMH
22 Place Gambetta
33000 BORDEAUX

<i>Ind</i>	<i>Date</i>	<i>Etabli</i>	<i>Vérifié</i>	<i>Modification</i>
A	02/12/2024	N. CHEVAL	R. PERROT-MINOT	Première diffusion

SOMMAIRE

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE	3
2. DOCUMENTS DE REFERENCE	4
3. RAPPELS DU DIAGNOSTIC	5
4. PHILOSOPHIE D'INTERVENTION	10
4.1. Objectifs	10
5. NOTE D'HYPOTHESES DE CALCUL	13
5.1. Hypothèses générales.....	13
5.2. Principes de dimensionnement des ouvrages de structure.....	13
6. SPECIFICATION TECHNIQUES DES OUVRAGES	16
6.1. Matériaux existants.....	16
6.2. Matériaux neufs	17
7. LISTE DE TRAVAUX	19
7.1. Etudes et investigations.....	19
7.2. Terrassements et démolitions.....	20
7.3. Ouvrages de renforcement.....	24
8. ANNEXES	30
8.1. Annexe 01 / Pièces graphiques.....	30
8.2. Annexe 02 / Note technique AEGIS Ind 0 du 27/11/2024	30

1. OBJECTIFS DE L'ETUDE

Le présent rapport a pour objectif de définir les ouvrages de structure pour les travaux de consolidation d'urgence de la tour St Nicolas à La Rochelle. Cette étude est menée sous la direction de M. Olivier SALMON, architecte en chef des Monuments historiques et en partenariat avec AEGIS pour la géotechnique opérationnelle.

Cette note ne constitue pas un CCTP mais une liste de préconisations de travaux de structure.

Nota : la présente note n'intègre pas la gestion des interfaces maritimes, archéologiques, environnementales, de sécurité et santé des travailleurs, etc...

2. DOCUMENTS DE REFERENCE

Études préalables

[EP -01] Etude de stabilité de la tour_Diagnostic / **Agence Ph. Villeneuve** / Mai 2016

Études documentaires, historiques et archives

[HI -01] Une double révolution à La Rochelle : la Tour St Nicolas, Bulletin Monumental, tome 148-II / **J. Mesqui** / 1990

[HI -02] La Rochelle, TSN - Rapport final d'opération : suivi archéologique de sondages structuraux et géotechniques :
Volume 1 – Texte, inventaires / Volume 2 – Annexes, planches / **ATEMPORELLE, Florence Boisserie** / Février 2022

Relevés et instrumentation

[RG-01] Auscultation d'ouvrage, compte-rendu de mesures n°10 / **BATIGEO Conseil** / Mai 2000

[RG-02] Relevés géométriques d'ensemble / **ART GRAPHIQUE ET PATRIMOINE** / 2015

[RG-03] Auscultation d'ouvrage, tableau de relevés [190236-Cibles-22.xls] / **SIT&A** / Avril 2019

[RG-04] Rapport d'installation R19 PA 651 Ind 1 / **SITES** / Avril 2019

[RG-05] Auscultation d'ouvrage, tableau de relevés [tableau de relevé des jauges.pdf] / **CSJ** / Juin 2019

[RG-06] Auscultation d'ouvrage, tableau de relevés [tableau jauges.xls] / **PROTECH Foudre** / Juin 2020

[RG-07] Rapport trimestriel n°12 R22 PA 652 Ind 0 / **SITES** / Mars 2022

[RG-08] Relevés géométriques d'ensemble / **BIMOTEP** / Juillet 2022

Études techniques

[ET -01] Rapport technique : lot n°1 – Sondages structuraux / Rapport RT-SS / **EXPIN** / Décembre 2020

[ET -02] Compte-rendu de sondages géotechniques / Dossier CNI8.K273 Ind B / **GINGER** / Février 2021

[ET -03] Diagnostic géotechnique / Mission G5 / Dossier CNI8.K273-001, rapport LGEN.L.076-001 Ind A / **GINGER** /
Juin 2021

[ET -04] Diagnostic structurel / Rapport n°17-027-01 Ind A / **EQUILIBRE STRUCTURES** / Septembre 2021

3. RAPPELS DU DIAGNOSTIC

Le **diagnostic géotechnique** réalisé en 2021 par GINGER, sur la base d'une campagne de sondages réalisés depuis le quai Nord-Est et l'intérieur de la tour, a permis de dresser les constats suivants :

- Le système de fondations de la tour est constitué d'un **radier en maçonnerie** (base à -3m NGF) **sur grillage et pieux flottants en chêne** blanc d'Europe de forte section (30-40cm) et maillage dense (espacement 10-40cm) avec sabots en fer (4-5m de longueur environ jusqu'à -8,6m NGF) ; les études menées sur les pieux ont révélé un niveau de dégradation moyen à fort sur la plupart des échantillons analysés en tête de pieux
- La tour est en appui sur une **couche homogène d'argiles limoneuses grises vasardes**, de résistance faible (pression limite $pl^*=0.5\text{MPa}$) et très compressibles (module $E_m=7\text{MPa}$, $CC=0.34$), sensibles à l'eau (GTR B5/A1/2), moyennement plastiques ($16 < I_p < 20$), sous-consolidées (rapport $OCR=1/3$ à $1/2$) avec une teneur en matière organique non-négligeable (2 à 9%) et présence de gaz sulfuré (H_2S)
- La profondeur du **substratum marno-calcaire** est évaluée à environ -12/13m NGF
- Les sols ne sont pas sensibles au risque de liquéfaction
- Le sol présente des **décompressions** sous le niveau de radier en maçonnerie
- Le système de fondations présente une **stabilité limite** vis-à-vis du poinçonnement (coefficient de sécurité 1.05)

Les **diagnostics architectural, structurel et archéologique** réalisés entre 2018 et 2021 ont permis de confirmer que :

- La tour a été **réalisée en deux étapes** : une première phase de construction vers 1333 (selon dendrochronologie des pieux) avec un premier basculement de la tour inachevée vers le nord-est, puis une seconde phase après renforcement (couronne externe de pieux datée > 1347) et achèvement de la tour avec un nouvel aplomb
- Plusieurs **campagnes de travaux importants** ont eu lieu sur l'édifice, notamment :
 - La substitution des parements en maçonnerie de la base immergée des façades ouest et sud, milieu XVIIIème siècle (plans d'archives projet 1740)
 - L'élargissement des glacis sous les zones d'encorbellements en façades ouest et sud au cours du XVIII ou XIXème siècle (non-daté)
 - Des travaux de remplacement/restauration importants sur les parements de façades fissurés en 1884-88 (Arch. Lisch), avec de nombreuses assises en fuseau pour rattraper les défauts de verticalité liés au basculement de la tour
 - La restauration de la jonction avec le rempart Est en 1902-04 (Arch. Ballu)
 - Des travaux de consolidation des maçonneries de la base de l'édifice par injections de ciment Portland en 1914-16, puis en 1970 (Arch. Mastorakis) à la base de l'édifice sur tout son périmètre (forages d'injection visibles en façade Est)

On note que des blocs en béton non-armé ont été identifiés à la base de la façade Nord jusqu'à une profondeur de 2,5m lors de la dernière campagne de sondages géotechniques.

- Les maçonneries de la tour présentent un **parement avec blocage hétérogène**, avec des épaisseurs de mortier conséquentes, mais **de bonne compacité** et globalement avec des raideurs similaires (selon essais radar et laboratoire). Dans les étages inférieurs, les relevés radar ont mis en évidence des **vides francs**, notamment dans les zones de marnage, et des **zones de fragilité** sont identifiées au niveau des modifications géométriques du XVIIIème siècle et des substitutions de parements (plaquettes ?) du XIXème siècle.
- Le parement est réalisé en **Pierre calcaire blanchâtre** de 30-60cm d'épaisseur (résistances de 9 à 19 MPa), tandis que le blocage est en pierre calcaire plus grise (résistances de 29 à 64 MPa), avec de nombreuses inclusions de pierres d'autres natures (quartz, feldspaths, micas).
- Le **mortier est dur** et constitué de chaux aérienne ou hydraulique selon les prélèvements (résistances de 1,6 à 4,9 MPa)
- La tour présente **deux niveaux de tirants métalliques internes** (sous le sol des niveaux salle intermédiaire et haute), probablement réalisés en XIXème siècle (non-daté), dont l'efficacité est bonne en partie centrale de la tour, avec une capacité d'ancrage néanmoins limitée (environ 10T par tirant), mais négligeable en périphérie par défaut de continuité au droit des couloirs traversés (système de report trop souple)

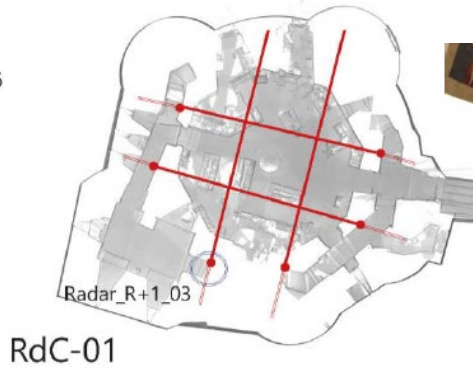
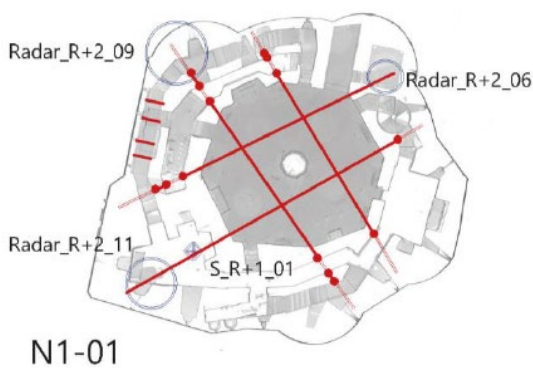


Figure 1 – Tirants métalliques existants (fin XIXème) sous le sol des salles intermédiaire et haute

L'analyse des **désordres et déformations** montre que la tour comporte plusieurs plans de fracturation quasi-verticaux sur toute sa hauteur, certaines fissures en façade n'étant plus visibles depuis les reprises de parements réalisées fin XIXème. Des zones de fracturation diffuses à la base des façades ouest et sud constituent des zones sensibles dans lesquelles la géométrie des murs a été modifiée et dont les maçonneries sont soumises au marnage qui entraîne une dissolution des mortiers de hourdage. La rampe d'accès présente des fissures verticales.



Figure 2 – Relevé des désordres constatés aux abords de la tour St Nicolas (07/2024)

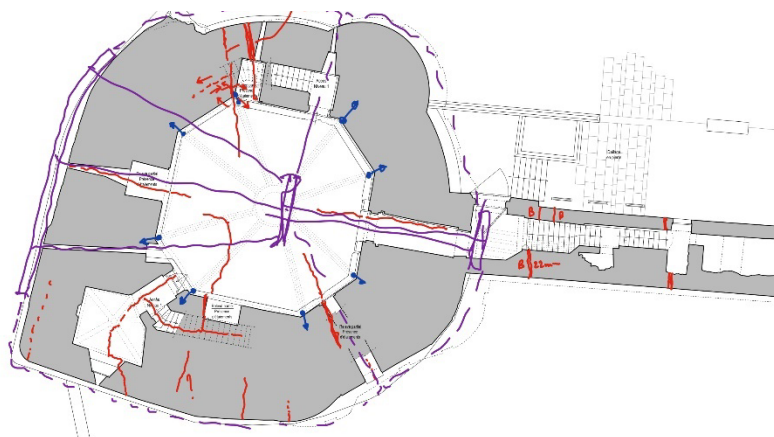


Figure 3 – Relevé des désordres structurels / Salle basse

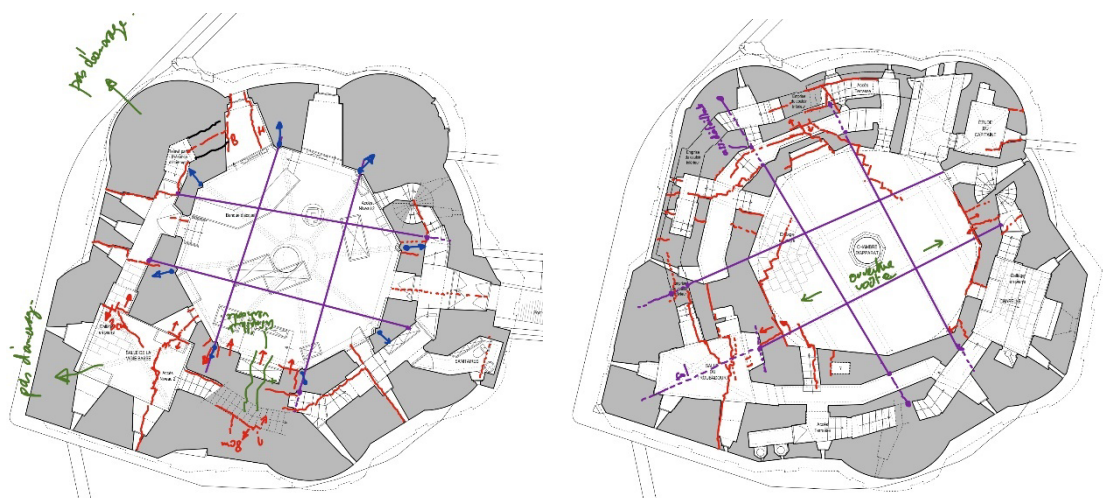


Figure 4 – Relevé des désordres structurels / Salles intermédiaire et haute

La tour a subi depuis sa construction un **mécanisme de rotation d'ensemble** vers le nord-est (N62°) de l'ordre de 3° depuis sa construction, soit environ 1,1m de tassement différentiel, en deux étapes (2° en première phase de construction, 1° depuis l'achèvement de la construction). Ce **mécanisme primaire** évolue rapidement depuis 2019 avec un tassement différentiel de 3,5mm/an vers le nord-est, soit un dévers de 4,7mm/an en tête.

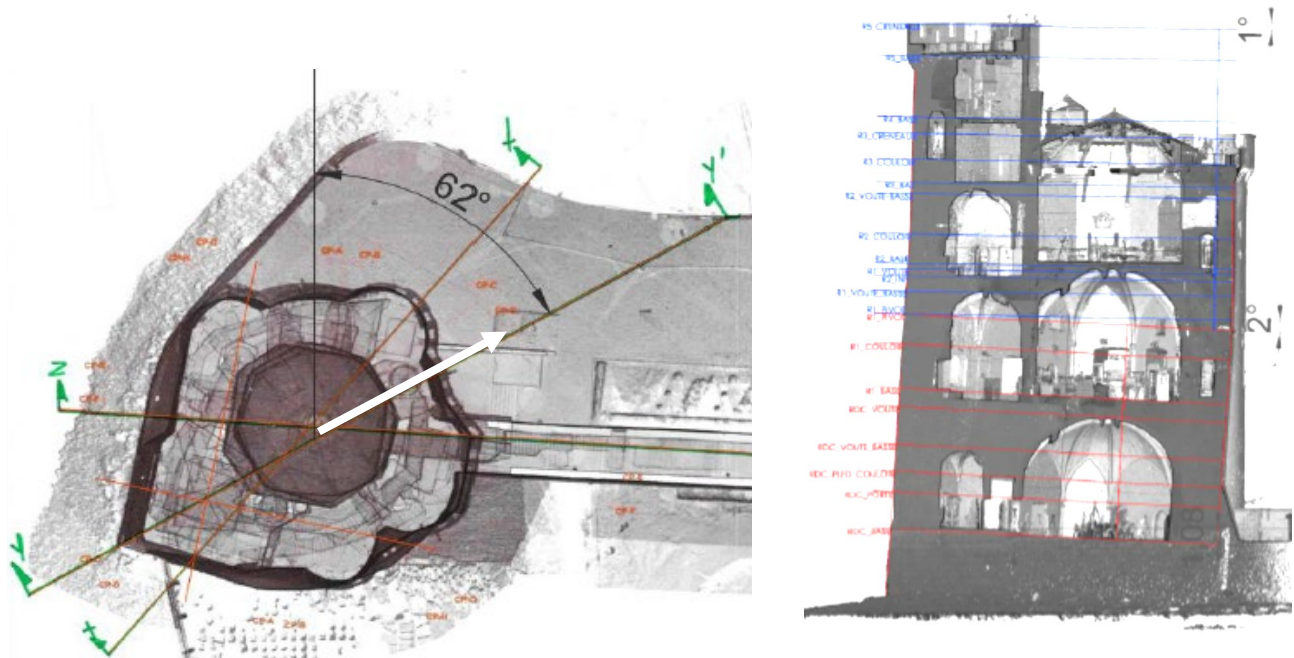


Figure 5 – Orientation de la ligne de dévers maximal et angles de rotation de la tour (selon coupe XX)

Ce mécanisme de tassement/déversement est accompagné, probablement depuis le XVIIIème siècle, **d'un phénomène d'ouverture de la tour en deux parties par sa base.**

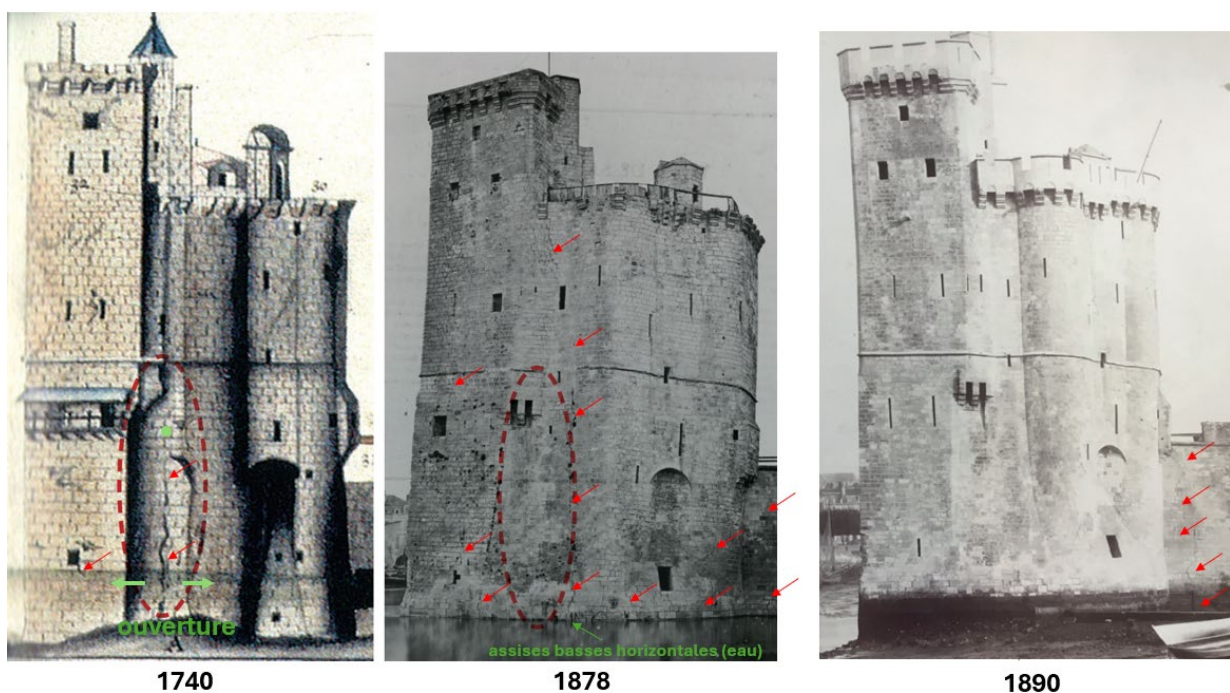


Figure 6 – Chronologie d'évolution des désordres en façade sud de la tour

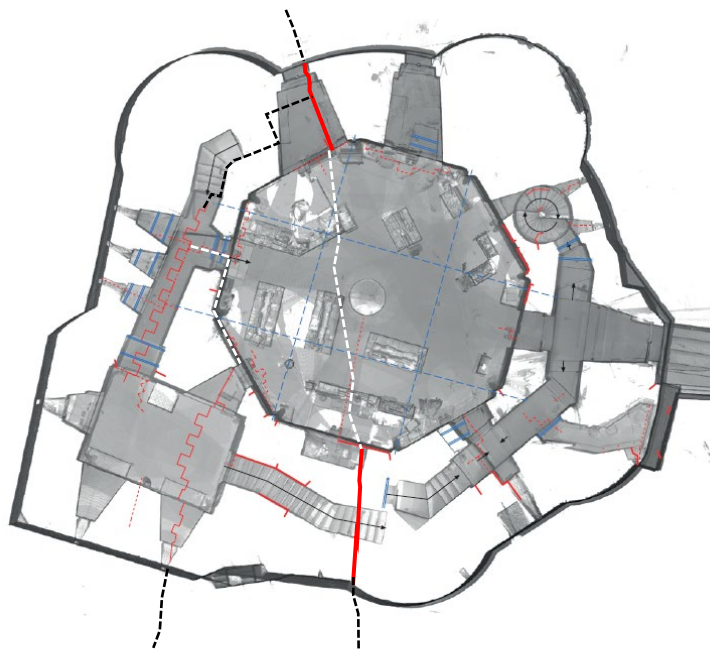


Figure 7 – Synthèse des plans de fracturation d'ensemble (niveau salle intermédiaire)

Une surveillance par monitoring automatisé est réalisée par SITES depuis 2019, complétée par des jauges Saugnac relevées par PROTECH FOUORE.

En juillet 2024, une alerte déclenchée sur un fissuromètre côté nord et un constat visuel de l'apparition de fissures côté sud de la tour, ont permis d'identifier la présence d'un **mécanisme de translation de la tour et du quai nord vers l'ouest**, plus marqué dans son angle sud-ouest (pied de l'éperon). Ce mécanisme est légèrement visible depuis 2019 (environ 3mm/an), mais s'est fortement accéléré depuis mars 2024 (15 à 22mm en 6 mois selon les zones). En première analyse, ce mécanisme semble corrélé aux courants de chasse du port associés aux marées de fort coefficient.

La comparaison de deux nuages de points réalisés en 2022 et 2024 permet de confirmer ce mécanisme et de mieux comprendre sa cinématique.

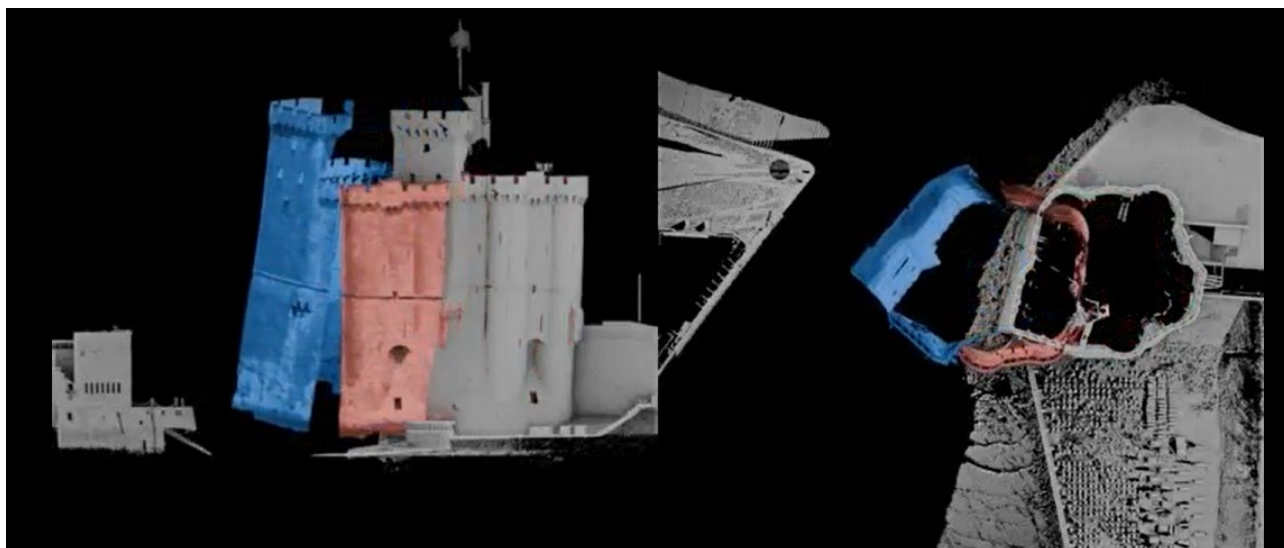


Figure 8 – Synthèse du mécanisme de la tour entre deux nuages de points successifs établis les 31/05/2022 et 05/09/2024

4. PHILOSOPHIE D'INTERVENTION

4.1. OBJECTIFS

L'objectif principal de cette opération de **travaux d'urgence** est d'améliorer le **monolithisme transversal de la tour** par la réalisation de plusieurs ouvrages provisoires d'enserrement des maçonneries, notamment :

- Un frettage périmétral de la base par 11 niveaux de ceintures en câbles de précontrainte multi-torons actifs et dispositifs d'appui métalliques sur platelage bois pour la répartition des efforts sur la maçonnerie (*pour empêcher la dissociation horizontale du radier de fondation en maçonnerie*)
- Un frettage périmétral de la salle intermédiaire par 2 x 2 niveaux de ceintures en câbles de précontrainte mono-torons actifs et platines d'angle métalliques sur couchis bois pour la répartition des efforts sur la maçonnerie (*pour empêcher la dissociation horizontale des maçonneries en élévation*)
- Deux frettages radiaux par tiges de coffrage et platines d'angle et d'about sur platelages bois

Cette intervention constitue l'**étape préliminaire** à une opération de **reprise en sous-œuvre ultérieure** par semelle d'élargissement périmétrale et colonnes de jet-grouting, qui aura pour objectif de stabiliser la tour en lui assurant un appui sur le substratum marneux.

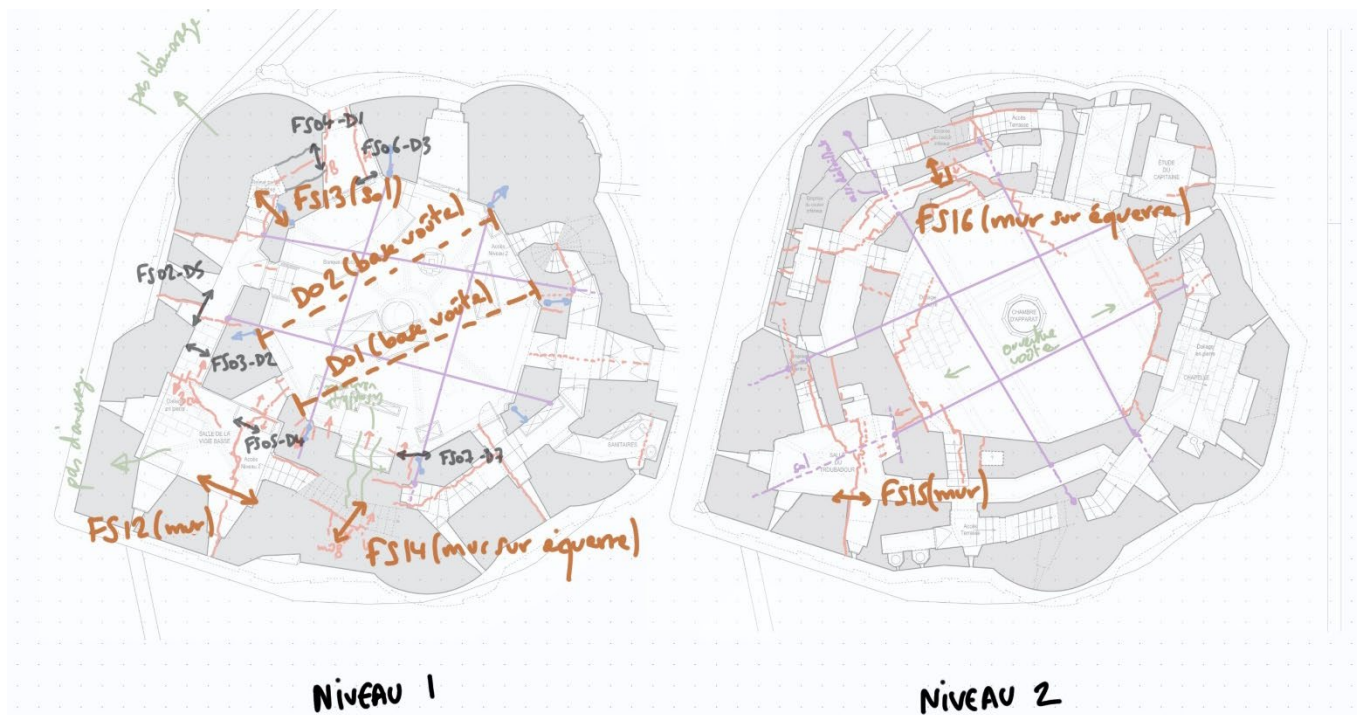
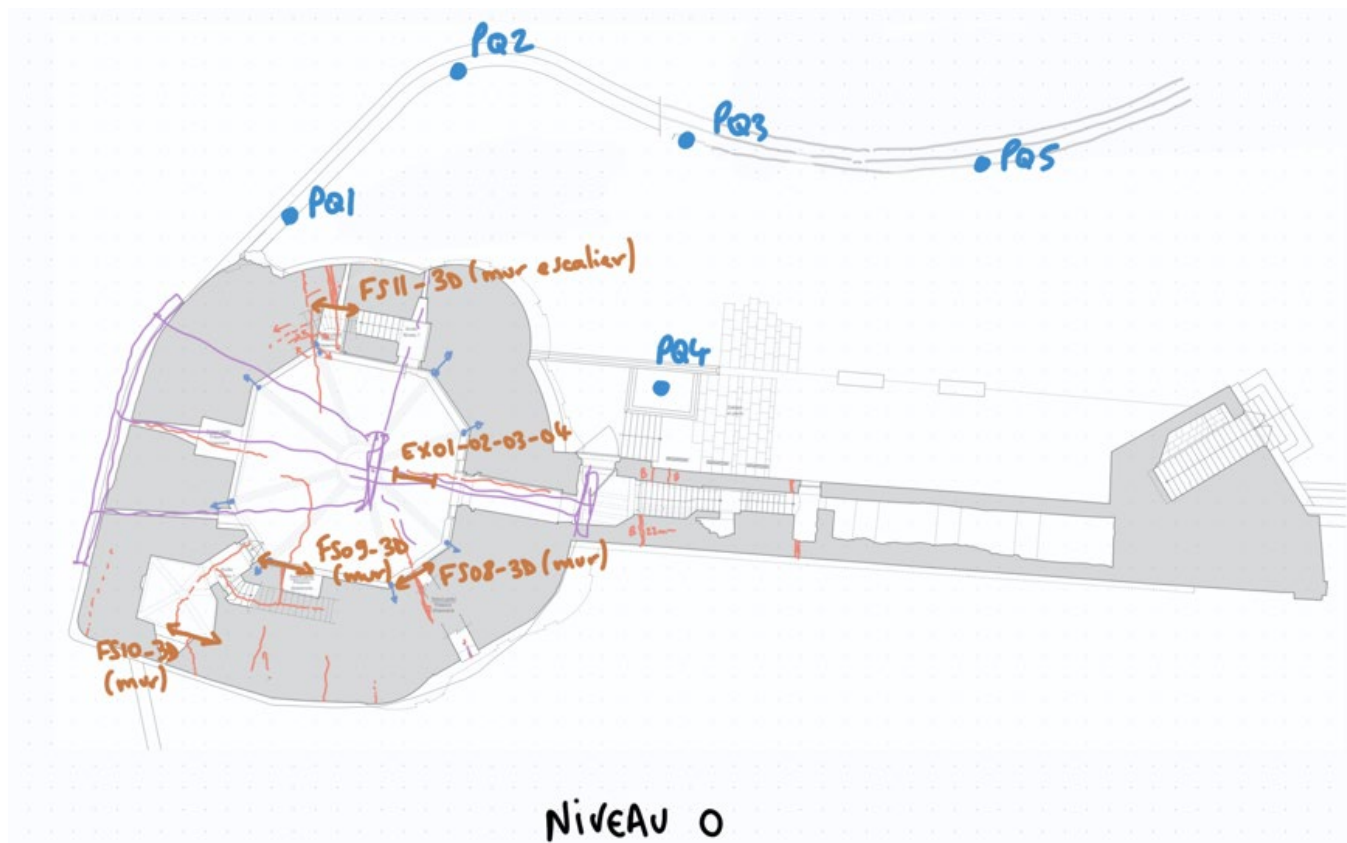
Nota : un échafaudage périmétral des façades non-accessibles sera réalisé pour permettre la réalisation des travaux de frettage périmétral de la base ; les travaux en élévation seront réalisés par cordistes et par sapines d'accès ponctuelles

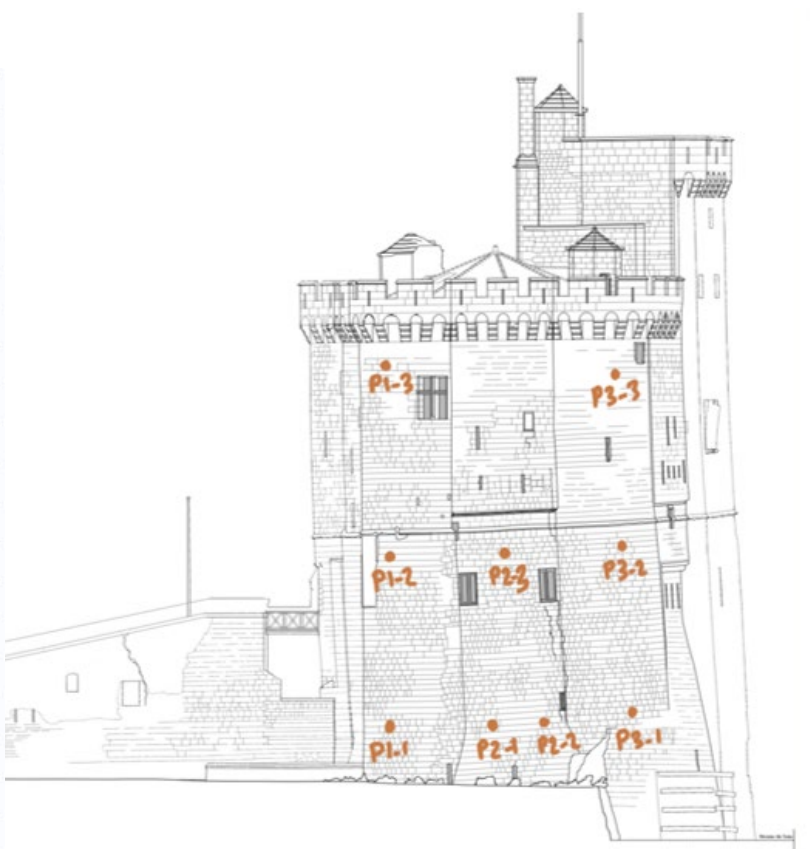
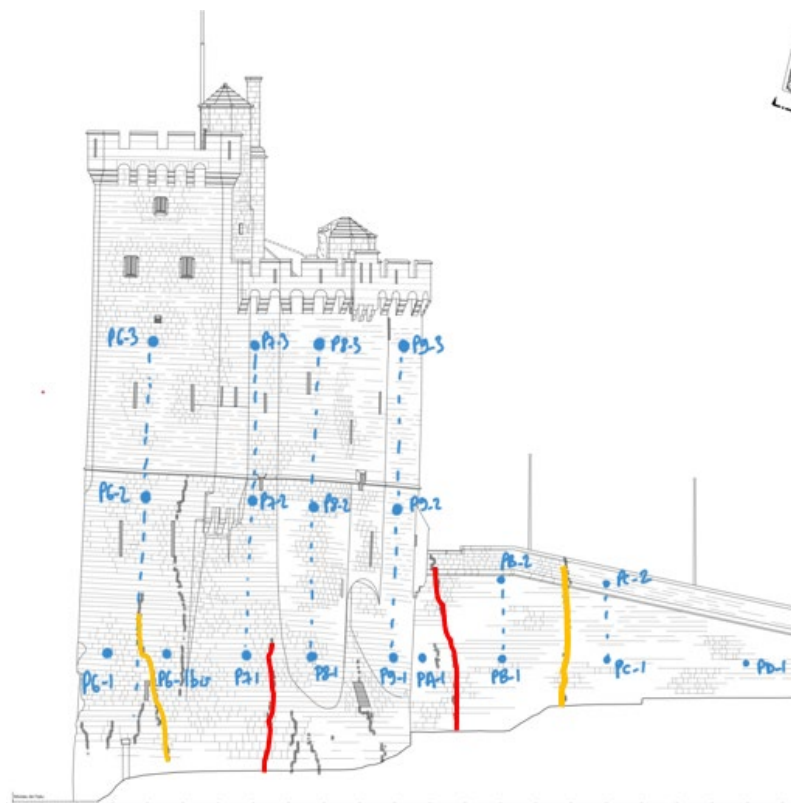
Les travaux seront réalisés **sous contrôle permanent par un système de surveillance géométrique** de l'édifice existant mis en place depuis 2019 et complété en 2024, comprenant (voir repérage page suivante) :

- 2 tachéomètres automatisés permettant le suivi en XYZ de cibles placées sur les façades de la tour et de la rampe
- 16 fissuromètres automatisés placés sur les principales fissures
- 2 télémètres placés sous la voûte de la salle intermédiaire
- 4 extensomètres à corde vibrante placés sur les tirants de frettage installés en 2019 sur la salle basse
- Géotechnique : tubes inclinométriques en forage / piézomètres / cellules de pression intersticielle

Ce système est relié à un dispositif d'alerte SMS et par sirène.

Les seuils et envois d'alertes seront adaptés en lien avec l'entreprise en charge du présent marché.





5. NOTE D'HYPOTHESES DE CALCUL

5.1. HYPOTHESES GENERALES

Catégorie	ERP (catégorie à préciser par MOA)
Neige	Région A2
Vent	Région 3 ; catégorie terrain 0 (zone côtière)
Sismicité	Zone 3 ; zone de sismicité modérée
Classe d'importance	Classe II (à confirmer par MOA) => Principe de non-aggravation de la vulnérabilité
Type de sol	Non-défini
Stabilité au feu	Non-défini

Charges d'exploitation

Espaces intérieurs / Terrasses :	Catégorie C3 (musées) :	$q_k=4\text{kN/m}^2$	$Q_k=4\text{kN}$
Quais :	Catégorie G ($30 < \text{PTAC} < 160\text{kN}$) :	$q_k=5\text{kN/m}^2$	$Q_k=90\text{kN}$

5.2. PRINCIPES DE DIMENSIONNEMENT DES OUVRAGES DE STRUCTURE

5.2.1. Frettage périmétral provisoire de la base

Objectifs

Le frettage de la base de l'édifice a pour objectif de s'opposer à la translation de la moitié ouest de la tour par rapport à la moitié est, et en particulier le pied de l'éperon sud-ouest. Cet ouvrage a également pour objectif d'améliorer le monolithisme de la tour en augmentant la résistance au cisaillement vertical de la tour dans les zones soumises aux phénomènes de dissociation.

Effort de calcul

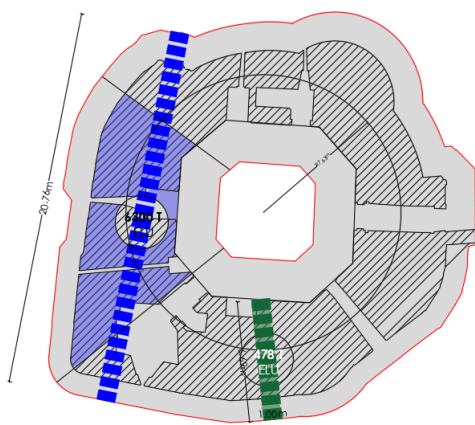
Les efforts de glissement associés à cette translation ont été évalués par AEGIS (voir annexe 2) en évaluant l'effort résultant F_s permettant d'effacer les mécanismes superficiels de rupture du sol situé sous la moitié ouest de la tour, considérée de façon défavorable comme totalement détachée du corps de la tour, et d'augmenter le facteur de sécurité de l'ordre de 15 à 25%, soit :

$$F_s = 1\,700\text{ T ELU soit }850\text{ T ELU par côté}$$

On considère également la possibilité que des décompressions localisées de fondation surviennent en phase provisoire pendant les opérations de reprise en sous-œuvre, engendrant la formation d'arcs de décharge et de poussées au vide associées, soit :

- La formation de petits arcs de décharge transversaux à la base des murs sur un demi-périmètre de tour (en vert, par ml)

- La formation de grands arcs de corde dans le plan des façades de la tour (en bleu)



POUSSEE AU VIDE D'UN ARC DE CORDE			
	Poids maçonnerie arc	6300 T	
	Poussée 1H/2V	1575 T sur un arc	
POUSSEE AU VIDE DES ARCS TRANSVERSAUX			
	Rayon moyen mur	7,63 m	
	Poids maçonnerie arc	478 T/ml	
	Poussée 1H/2V	120 T/ml	
	Poussée globale	1195 T sur 10ml de décompression (salle basse)	

Les poussées associées à ces scénarii sont respectivement estimées à :

Fa,bleu = 1 575 T ELU par côté

Fa,vert = 1195/2=598 T ELU par côté

Ces calculs sommaires seront affinés dans le cadre des études détaillées réalisées en phase APD. A ce stade, on retiendra la valeur sécuritaire de **1 575 T ELU** par côté pour le dimensionnement des câbles. Cette solution permet également de limiter l'allongement résiduel des câbles en cas de rupture brutale à la base de la tour.

Mise en tension

Un serrage initial des ceintures de câbles sera donc réalisé pour un effort maximal 30% de la valeur de calcul ELS. Cette valeur sera définie ultérieurement en lien avec la maîtrise d'œuvre. Le serrage sera réalisé par paliers maximum de 5% de l'effort de calcul ELS par semaine, en lien étroit avec la société SITES chargée du suivi géométrique de l'édifice, pour valider la réaction de l'édifice après chaque étape de serrage.

La cinématique de serrage sera étudiée par l'entreprise pour éviter tout endommagement dans les ouvrages de liaison (cages de vérinage, cadre de porte, fourrures) lié à des chargements asymétriques (avec notes de calcul justificatives). L'allongement des câbles sera suivi de manière détaillée afin de détecter tout phénomène de déformation ou de plastification des maçonneries de l'édifice.

Des serrages ultérieurs seront décidés en lien avec la maîtrise d'ouvrage et la maîtrise d'œuvre en fonction de l'évolution des efforts mesurés dans les ceintures et de l'évolution des mécanismes contrôlés par l'instrumentation.

Butonnages internes

Les butonnages de sécurité réalisés au niveau de la salle d'angle au sud-ouest de la salle basse ont pour objectif d'éviter toute déformation des maçonneries à proximité des zones d'appui des câbles de précontrainte sur l'éperon.

Ils seront conçus pour assurer la reprise d'un effort égal à 50% de l'effort de calcul ELU.

5.2.2. Frettages périmétriques provisoires en élévation

Objectifs

Un chaînage provisoire des élévations de la tour sera réalisé par deux techniques complémentaires :

- Deux niveaux de câbles de précontrainte externes périmétraux, afin d'assurer le monolithisme des parties hautes et de soulager les deux nappes de tirants existants, très fortement sollicités (rupture des zones d'appuis)
- Un niveau de tirants d'enserrement internes radiaux, afin d'ancrer directement de manière plus rigide les zones de tour non-ancrées par les tirants existants

Ces chaînages auront également pour objectif de limiter les effets de cliquet (dérive liée aux variations thermiques, sous l'effet du colmatage des fissures par des poussières) et les effets du dévers sur la cohésion de la structure, notamment dans la partie nord-est.

Effort de calcul

On considère l'hypothèse très défavorable que le frettage doit pouvoir s'opposer au moment engendré par le basculement de la demie-tour vers le nord-est en cas de dissociation totale en deux blocs.

Poids de la moitié de tour : environ 8500T ELU

Dévers maxi du centre de gravité : 50cm environ

Moment déstabilisant maxi lié au dévers de 2 blocs : $M_d = 8500 \times 0.50 = 4250 \text{ T.m}$

Les tirants sont placés respectivement à environ +12m et +20m par rapport à base de la tour, soit une résultante d'application à environ +16m, proche du centre de gravité du bloc de tour isolé.

On obtient donc un effort total de $4250 / 16 = 265 \text{ T}$ à reprendre, réparti à 50% sur les chaînages et 50% sur les tirants d'enserrement, soit :

- **Sur les chaînages : $265 \times 0.5 / 4 / 2 = 16.5\text{T}$ par câble (activation 50%)**
- **Sur les tirants d'enserrement : $265 / 2 = 133\text{T}$ par tirant double**

6. SPECIFICATION TECHNIQUES DES OUVRAGES

6.1. MATERIAUX EXISTANTS

Pierres de parement : pierre calcaire blanchâtre de 30-60cm d'épaisseur (résistances de 9 à 19 MPa)

Pierres de blocage : pierre calcaire grise (résistances de 29 à 64 MPa), avec de nombreuses inclusions de pierres d'autres natures (quartz, feldspaths, micas)

Mortiers : chaux aérienne ou hydraulique / bonnes caractéristiques selon les prélèvements (résistances de 1,6 à 4,9 MPa)

Gamma, m = 3,3/2 = 1,65 (après coulinage des zones de parement décomprimées identifiées par radar)

Caractéristiques de la maçonnerie				NC 29/11/2024
Masse volumique	pm1	2,4	T/m3	
Coeff. partiel de la maçonnerie	ym	1,65		Elément de catégorie 2, tous mortiers, IL2 / EN 1996-2
Résistance du mortier	fm	4	MPa	Moyenne des essais sur mortiers
Rés. Moy. normalisée des blocs	fb	13	MPa	Moyenne des essais sur pierres de parement
Montage des blocs	Mortier Courant			D'après observation in situ
	K	0,45		(Tab 3.1 + 3.3) EN 1996-11
	alpha	0,70		Joints épais
	beta	0,30		
Rés. Caract. à la compression	fk	4,01	MPa	Clause 3.6.1.2 NF EN 199611 $f_k = K \cdot f_b^\alpha \cdot f_m^\beta$
Coefficient de confiance	CFK	1,00		Pas de considération de l'action sismique CFK=1
Rés. en compression	fd	2,43	MPa	
Module d'élasticité court terme	Em	4010	MPa	Selon NF EN 1996-1-1+A1 (mars 2013), 3,7,2 ou essai norme EN10
Module de cisaillement	Gm	1604	MPa	On prend G=0,4*E, selon NF EN 1996-1-1+A1 (mars 2013), 3,7,3
Rés. Caract. au cis. des blocs	fvk	0,86	MPa	Résistance caractéristique au cisaillement des blocs = 0,065*fb
Cohésion du mortier	fvk0	0,15	MPa	Elément de maçonnerie en silico calcaire, mortier d'usage courant

6.2. MATERIAUX NEUFS

Acier de construction

Aciers de construction : nuances S355J2 ou S275J0 selon prescriptions

Eléments de charpente : profils laminés à chaud ou tubulaires issus du commerce ou PRS

Assemblages : soudure classe EXC3
boulons HR ou ordinaires selon prescriptions

Interconnexion des masses : connexion par liaison équipotentielle reliée à la terre

Contrôle : essais non-destructifs de contrôle des soudures par ultrasons ou rayons X

Protection anti-corrosion : usage extérieur : galvanisation à chaud
usage intérieur ; primaire anticorrosion

Acier HR (haute-résistance)

Résistance mécanique minimale : $f_y = 500\text{MPa}$ / $f_u = 650\text{MPa}$

Protection anticorrosion : galvanisation à chaud

Bois de charpente

Classe de résistance : bois feuillus – D30 (selon NF EN338) ou QPA

Provenance : conforme au référentiel PEFC ou FSC ou forêts françaises (sous réserve accord MOE)

Caractéristiques : bois neuf / état de surface raboté / purgés d'aubier / compatibilité NF EN460

Classe de service : extérieur : classe 3 / intérieur : classe 2

Classe d'emploi : extérieur : traitement autoclave / classe d'exposition 4
intérieur : classe 2

Armatures en fibre de verre

Résistance caractéristique minimale en traction : 760 MPa

Module d'élasticité minimal : 40 000 MPa

Résistance au cisaillement minimale : 100 MPa

Contenu en fibres : >65%

Résines époxy bi-composants pour scellements

Résine époxy très haute performance type HIT-HY 200

Coulis de chaux structural pré-formulé

Compatible maçonneries anciennes avec absence de sulfates/chlorures et ciment

Granulométrie selon taille des fissures ou vides à injecter

Résistance à la compression à 90 jours : 4.9MPa

Système de précontrainte par câbles

Selon prescription du guide FABEM 8 STRRES

Résistance mécanique minimale : $f_u = 1860\text{MPa}$ pour les câbles

$F_u = 650\text{MPa}$ pour les ancrages

Protection anticorrosion : par injection au coulis de ciment et cachetage à la cire
galvanisation à chaud (en OPTION)

Gaines PEHD : PE80 ou PE100 / PN6.3

Mise en tension : sur-longueurs et toutes sujétions permettant la re-tension ultérieure de tous les câbles
par paliers (pour limitation des effets asymétriques dans les ouvrages de jonction)
fiches d'étalonnage des vérins à fournir / fiches de vérinage à fournir (effort initial, effort cible, allongement)
boîtes à sable pour permettre le desserrage progressif des câbles

Injection des gaines : contrôle d'étanchéité
épreuve de convenance sur première gaine injectée

Ancrages : protection par capots en acier galvanisé à chaud démontables

7. LISTE DE TRAVAUX

Nota général : Cette liste de travaux concerne exclusivement les ouvrages de structure comprenant les étaitements, démolitions et déposes, renforcement et modification d'ouvrages existants, créations d'ouvrages neufs. Elle exclut les protections et les installations de chantier, l'étanchéité, le clos-couvert, les réseaux, la gestion des eaux pluviales, les dispositions liées au compartimentage incendie (coupe-feu des parois), les équipements, la géotechnique, les ouvrages de VRD et d'infrastructures (quais), les échafaudages, le second-œuvre, les ouvrages maritimes provisoires (pontons, batardeaux, pompage), les sujétions liées à la présence de plomb/amiante, la menuiserie, la serrurerie, les décors, la restauration des parements, etc...

Les travaux d'installations de chantier courantes, de restauration et remplacement des maçonneries sont décrits par l'ACMH.

7.1. ETUDES ET INVESTIGATIONS

Etudes d'exécution

Réalisation des études d'exécution pour l'ensemble des ouvrages provisoires et définitifs réalisés, comprenant :

- Le relevé géométrique complet et l'état sanitaire des ouvrages existants
- La méthodologie de réalisation des ouvrages
- Les fiches techniques et avis techniques des produits mis en œuvre
- Les plans d'ensemble et de détail des ouvrages au format BIM REVIT (sur base nuage de point transmis par le MOA) - LOD 400 pour l'ensemble des ouvrages réalisés
- Les notes de calcul justificatives des ouvrages provisoires, existants modifiés et neufs
- Les essais, avis de chantier ou ATEX justificatifs des produits mis en œuvre

Les documents seront soumis pour visa à la maîtrise d'œuvre et au bureau de contrôle jusqu'à l'obtention d'un visa sans observations.

Dossier des ouvrages exécutés

Réalisation du dossier des ouvrages exécutés comprenant :

- Les plans d'ensemble et de détail de recollement des ouvrages réalisés au format BIM REVIT (sur base nuage de point transmis par le MOA) - LOD 400 pour l'ensemble des ouvrages réalisés
- Les notes de calcul justificatives validées sans observations
- Le dossier d'intervention ultérieure sur l'ouvrage (DIUO)
- Les procès-verbaux d'essais réalisés
- Un reportage photographique de réalisation des ouvrages (avant/après intervention)

Instrumentation automatisée de câbles de précontrainte

Fourniture et pose d'un système d'instrumentation automatisée des efforts dans les câbles de précontrainte, comprenant :

- Toutes sujétions liées à la mise en œuvre et au bon fonctionnement du système (fixations, protections, moyens d'accès, etc.)
- Fourniture et mise en œuvre de capteurs de force annulaires 200kN et 2000kN
- Centrale d'acquisition
- Enregistrement automatisé et transmission 4G des données en temps réel
- Définition des seuils de vigilance et d'alerte SMS (à étalonner en lien avec la maîtrise d'œuvre)
- Interface web de consultation des données
- Mesure des températures au droit des zones de mesure
- Entretien permanent du dispositif (remise en état sous 5 jours ouvrés en cas de panne)
- Dépose du système et remise en état des lieux dito existant
- Boîtiers de protection

Durée : 5 ans + année supplémentaire en OPTION

Fréquence des mesures : continu

Précision : 10kN

Périodicité des rapports : rapports d'analyse annuels

Localisation : 4 capteurs de force annulaires 200kN (sur platines d'angle)

22 capteurs de force annulaires 2000kN (sur cages de vérinage)

7.2. TERRASSEMENTS ET DEMOLITIONS

Terrassement en déblai/remblai par tranchée blindée

Terrassement en déblais/remblais de type tranchée blindée, compris dépose des revêtements de sols en conservation, démolition des dallages, dépose de tous les réseaux anciens et ouvrages enterrés légers existants rencontrés pendant les terrassements, toutes sujétions liées à la présence d'un suivi archéologique permanent, stockage des terres à proximité, blindage traditionnel type planches/madriers/butons en Douglas, pompage ponctuel à marée haute, remblaiement par couches compactées de 30cm maximum, évacuation en décharge adaptée des gravais et déblais excédentaires

Méthodologie : par outillage léger et mini-pelle (selon possibilités)

remblaiement après pose de l'ossature de fourrure et des câbles de fretage

Localisation : Façade Est / Cour anglaise et entrée salle basse

Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Terrassement en déblai par tranchée blindée

Terrassement en déblai de type tranchée blindée, compris dépose des revêtements de sols en conservation, démolition des dallages, dépose de tous les réseaux anciens et ouvrages enterrés légers existants rencontrés pendant les

terrassements, toutes sujétions liées à la présence d'un suivi archéologique permanent, blindage traditionnel type planches/madriers/butons en Douglas, évacuation en décharge adaptée des gravais et déblais

Méthodologie : par outillage léger et mini-pelle (selon possibilités)

Localisation : Façade Nord / A proximité de l'ancien rempart / Puits blindé d'accès à la cage de vérinage
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Démolition de gros béton par tranchée blindée

Démolition de gros béton avec tranchée blindée, compris dépose des revêtements de sols en conservation, démolition des dallages, dépose de tous les réseaux anciens, démolition de gros béton existant, toutes sujétions liées à la présence d'un suivi archéologique permanent, blindage traditionnel type planches/madriers/butons en Douglas, évacuation des gravais en décharge adaptée

Méthodologie : par pré-sciage et démolition par outillage léger (faible percussion)

Localisation : Façades Nord et Est / Niveau Quai
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Terrassement en remblai

Terrassement en remblais type GNV 0/31.5 compactée, compris dépose des blindages existants et évacuation en décharge adaptée

Méthodologie : par mini-pelle

Localisation : Façades Nord et Est / Niveau Quai
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Création de bouchon de protection de marnage en gros béton

Fourniture et pose de bouchon en gros béton, compris coffrage soigné et coulage de gros béton de centrale sur polyane

Accès : depuis échafaudage de pied

Localisation : Façade Nord / En extrémité de l'ancien rempart
Façade Est / Mur de rampe côté Sud
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Création de plateforme de propreté en ballast

Fourniture et pose de plateforme de propreté en ballast

Localisation : Façades Nord et Est / En fonds de tranchées blindées
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Démolition de muret en béton armé

Démontage de muret en béton armé, compris sciage et évacuation des gravois en décharge adaptée

Méthodologie : par outillage léger

Accès : depuis échafaudage de pied

*Localisation : Façade Sud / En limite de la zone de stockage d'éprouvettes béton armé
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES*

Démolition de mur enterré en maçonnerie de moellons

Démolition de mur en maçonnerie de moellons, compris dépose des revêtements de sols en conservation, démolition des dallages, toutes sujétions liées à la présence d'un suivi archéologique permanent, stockage des moellons à proximité, évacuation des gravois en décharge adaptée

Méthodologie : par outillage léger

Accès : depuis échafaudage de pied

*Localisation : Façade Nord / Ancien rempart sous le niveau du quai
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES*

Démontage en conservation de mur de façade en maçonnerie de pierres de taille

Démontage de mur en maçonnerie de pierres de taille, compris numérotation des pierres, tous étaitements préalables nécessaires, dépose et stockage sur palettes, évacuation des gravois en décharge adaptée

Méthodologie : par outillage léger

Accès : depuis échafaudage de pied

*Localisation : Murs de façade de la rampe / Côtés nord et sud
Façade Est / Mur de soutènement en bordure de cour anglaise
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES*

Dépose de sommier d'appui d'ancrage de frettage

Dépose de sommier d'appui existant en profils acier HEB, compris fourniture et pose de dispositif de transfert de charge provisoire en profils UPN doubles, connecteurs pour tiges d'ancrage type DYWIDAG, écrous provisoires et vérinage de transfert, découpe des profils existants, dépose des profils existants et mise en décharge spécifique, dépose du dispositif de transfert de charge

Accès : depuis échafaudage de pied

*Localisation : Façade Est / Au droit de l'entrée de la salle basse
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES*

Modification de chevalement de cintre existant en bois

Modification de chevalement de cintre existant, compris fourniture et pose de montants et entretoises complémentaires en bastaings de sapin assemblés par tirefonds et boulons, découpe des montants existants, évacuation en décharge adaptée, recalage des couchis d'appui de cintres existants

Accès : *par cordistes*

Localisation : *Pièce angle Sud-Ouest / Niveau salle basse*
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

7.3. OUVRAGES DE RENFORCEMENT

Renforcement de maçonnerie par rejointoiement et coulinage à la chaux

Renforcement de mur en maçonnerie par coulinage gravitaire au coulis de chaux, compris rejointoiement préalable, percement et scellement de canules et vases d'injection, remaillages localisés en accompagnement, réalisation des injections de bas en haut, dépose des canules et reprise des joints

Précisions : *selon prescription guide FABEM STRRES*
 maillage des injections : jusqu'à une profondeur de 2m/paroi externe, tous les 50cm maximum

Localisation : *Totalité du linéaire de fracture principales représentées sur les plans (sur épaisseur minimale 2m)*
 Parements décomprimés : base tour sud / base sud éperon / base tour nord-ouest
 Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Renforcement de parements de maçonnerie par brochage fibres de verre

Renforcement de parements de mur en maçonnerie par brochage en fibres de verre, compris perçage à la mèche diamantée D20mm maxi L=60cm, nettoyage des forages à l'eau, fourniture et pose de joncs fibre de verre D10mm mini, scellement à la résine époxy

Précisions : *selon prescription guide FABEM STRRES*
Localisation : *base de tour ronde sud / 2 joncs par m² / 10m²*
 Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Recalage et dépose ponctuelle de couchis existants en bois dur

Recalage de couchis bois existants, compris serrage en force et découpe éventuelle des cales situées dans l'emprise des ouvrages de renforcement à réaliser

Dépose des cales gênantes et évacuation en décharge adaptée

Localisation : *Recalage : totalité des cales de couchis de frettage existant*
 Dépose : cales de lisse supérieure

Renforcement par frettage en câbles mono-torons gainés graissés injectés

Fourniture et pose de renforcement par câbles mono-torons, compris mise en place des gaines PEHD avec fixation par colliers type feuillard inox 30mm ancrés dans les joints existants par vis inox et chevilles mécaniques extractibles (entraxe maxi 2m), manchons de continuité des conduits PEHD électro-soudés ou colliers à brides, équipement des gaines par pipes d'injection/événements/vases d'expansion/compensateurs de dilatation, rattrapage des jeux en extrémités de conduits par joints type GIBault, contrôle d'étanchéité, enfilage des torons de précontrainte T13S nus graissés avec sur-longueurs, cachetage et injection des gaines au coulis de ciment, contrôles non-destructifs et réinjections éventuelles, ancrages par pièces d'extrémité en fonte type FREYSSINET 1X15 ou équivalent, ancrages sur platines d'angle type FREYSSINET AD nC15 ou équivalent, serrage initial par vérin hydraulique monotoron, protection par capot galvanisé injecté à la cire industrielle

Précisions : *épreuves de convenance sur premier câble*

ancrages de mise en tension disposés en quinconce sur chaque niveau pour équilibrage des efforts
ancrages d'extrémité doubles sur platines d'angle / totalité des câbles

Accès : *par cordistes / 2 sapines ponctuelles au droit des zones de vérinage*

Localisation : *2 niveaux de ceintures / 2 câbles par ceinture / Totalité de la périphérie de la tour*
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

OPTION : ***protection anticorrosion des câbles par galvanisation***

Renforcement par frettage en câbles multi-torons gainés graissés injectés

Fourniture et pose de renforcement par câbles multio-torons, compris mise en place des gaines PEHD avec fixation par cordes sur anneaux inox ancrés dans les joints existants par vis inox et chevilles mécaniques extractibles (entraxe maxi 1m) sur les longueurs libres, manchons de continuité des conduits PEHD électro-soudés, équipement des gaines par pipes d'injection/événements/vases d'expansion/compensateurs de dilatation, rattrapage des jeux en extrémités de conduits par joints type GIBAUT, contrôle d'étanchéité, enfilage des torons de précontrainte T13S nus graissés avec sur-longueurs, cachetage et injection des gaines au coulis de ciment, contrôles non-destructifs et réinjections éventuelles, ancrages par pièces d'extrémité type FREYSSINET AD nC15 ou équivalent, boîtes à sable cylindriques en tubes/plats acier S355 raidis avec joints et événements boulonnés, serrage initial par vérins hydrauliques monotorons, protection par capot galvanisé injecté à la cire industrielle

Précisions : *épreuves de convenance sur premier câble*
ancrages doubles sur 2 cages de vérinage + boîtes à sable cylindriques / totalité des câbles
ancrages doubles pour passage de cadre de porte / 5 câbles 12T13S

Accès : *par échafaudage de pied continu*

Localisation : *4 niveaux de ceintures en câbles 7T13S / Totalité de la périphérie de la tour*
7 niveaux de ceintures en câbles 12T13S / Totalité de la périphérie de la tour
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

OPTION : ***protection anticorrosion des câbles par galvanisation***

Ossature de cages de vérinage en ossature métallique

Fourniture et pose de cages de vérinage doubles en ossature acier galvanisé, compris cadres en profils acier S355 type HEA raidis, entretoises en tubes acier S355 forte épaisseur, platines d'appui en plats acier S355 épais raidis, assemblages des deux cadres par platines d'about et boulonnage HR, tubes acier de maintien transversaux avec platines pour fixation sur la tour et gousset d'articulation, ancrages par chevilles chimiques

Accès : *par échafaudage de pied*

Levage : *par grue automotrice lourde (inclus dans le poste) / maxi 4T par colis*

Localisation : *frettage par câbles multi-torons / 2 cages doubles / côtés nord et sud*
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Ossature de cadre de passage de porte

Fourniture et pose de cadre de porte double en ossature acier galvanisé, compris cadres en profils acier S355 type HEA raidis, assemblages par boulonnage renforcés par jarrets, assemblage boulonné pour support de profils d'ancrage de tirants de frettage existant, platines d'appui en plats acier S355 épais raidis, assemblages des deux cadres par boulonnage

Accès : *par échafaudage de pied*

Levage : *par grue araignée par petits éléments*

Localisation : *frettage par câbles multi-torons / 1 cadre double / côté est entrée salle basse*
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Ossature de boutonage

Fourniture et pose d'ossature de boutonage intérieure en acier traité anticorrosion, compris montants raidisseurs en profils acier S355 type HEB raidis, boutons en tubes ronds forte épaisseur acier S355 assemblages par platines d'about et boulonnage, platines d'appui en plats profils HEA acier S355 raidis, platelage de répartition en bastaings chêne ep.100mm mini

Levage : *assemblage par petits éléments*

Localisation : *Pièce angle Sud-Ouest / Niveau salle basse*
2 lignes de 4 boutons forte charge
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Remise en tension de câble monotoron

Remise en tension ultérieure, compris dépose de capot à cire, serrage par vérin hydraulique monotoron, repose de capot à cire

Accès : *2 sapines ponctuelles au droit des zones de vérinage*

Localisation : *2 niveaux de ceintures / 2 câbles par ceinture / 1 ancrage par câble*

Nombre : *1 remise en tension à la fin du chantier*
4 remises en tension ultérieures

Remise en tension de câble multi-torons

Remise en tension ultérieure, compris fourniture et pose de sapine d'accès, dépose de capot à cire, serrage par vérin hydraulique monotoron, repose de capot à cire, dépose de sapine d'accès

Accès : *sapine d'accès (montage/démontage ponctuels)*

Localisation : *4 niveaux de ceintures en câbles 7T13S / Totalité de la périphérie de la tour*
7 niveaux de ceintures en câbles 12T13S / Totalité de la périphérie de la tour

Nombre : 1 remise en tension à la fin du chantier
4 remises en tension ultérieures

Renforcement par tirants d'enserrement

Fourniture et pose de tirants d'enserrement, compris tiges d'ancrage acier HR galvanisé type DYWIDAG D40mm mini, ancrages d'extrémité par rondelles/écrous sphériques, contre-écrous, manchons de raccordement, calages d'appui bois au sol, déviateurs intermédiaires en ossature PRS, plats de liaison cintrés externes en acier galvanisé (sur couchis d'appuis en planches Douglas dans les parties courbes), mise en tension par serrage à la clé dynamométrique

Localisation : 2 tirants doubles en PB salle intermédiaire
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Carottages à tête diamantée

Réalisation de carottages à tête diamantée D100mm, compris mise en station de la carotteuse sur châssis, forage, nettoyage, conservation des bouchons de parements extérieurs, évacuation des gravois

Accès : depuis l'intérieur ou depuis sapine (tour nord-est avec proximité de décors)

Localisation : 8 carottages longs en PB salle intermédiaire
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Couchis d'appui de frettage simple

Fourniture et pose de couchis en bastaings chêne sous frettage, compris couchis en bastaings chêne ép. 100mm mini, solidarisation par plats acier cintrés et ancrage dans les joints existants par vis inox et chevilles mécaniques extractibles (entraxe maxi 0.5m)

Accès : par cordistes

Localisation : 2 niveaux de ceintures / sur les linéaires d'appui des frettages (tours rondes)
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Platines d'about de tirants d'enserrement en ossature métallique

Fourniture et pose de platines d'about en ossature, compris couchis en bastaings chêne ép. 100mm mini, ossature de répartition des charges en profils acier S275 type HEA/UPN cintrés galvanisés, assemblages par boulonnage/soudure, percements pour passage de tige et plats de fixation, ancrage dans les joints existants par vis inox et chevilles mécaniques extractibles

Accès : par cordistes

Levage : par treuil électrique suspendu par câbles

Localisation : 6 platines simples de tirants d'enserrement / PB salle intermédiaire
1 platine d'angle de tirants d'enserrement / PB salle intermédiaire

Platines d'angle d'extrémité de frettage monotorons en ossature métallique

Fourniture et pose de platines d'angle en ossature, compris couchis en bastaings chêne ép. 100mm mini, ossature de répartition des charges en profils acier S355 type HEA/tubes galvanisés, assemblages par boulonnage/soudure, ancrage dans les joints existants par vis inox et chevilles mécaniques extractibles

Accès : *par cordistes*

Levage : *par treuil électrique suspendu par câbles*

Localisation : *2 platines d'angle de frettages pour câbles monotorons*
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Dispositif d'appui courant de frettage par câbles multi-torons

Fourniture et pose de dispositif d'appui pour diffusion des efforts de frettage sur la maçonnerie, compris couchis d'appui en bastaings chêne ép. 100mm mini, mortier ou micro-béton de calage complémentaire sur polyane pour adaptation sur géométrie complexe (selon les zones, prise mer dans la zone de marnage), tubes/plats épais cintrés soudés en acier S355 galvanisé, support par montants acier S275 type HEA assemblés par boulonnage sur goussets, pieds de montants d'appui réglables en profils UPN doubles pré-perçés et verrouillés par boulonnage avec platines de pied, platelages d'appui en bastaings chêne croisés connectés par tire-fonds et fixés sur poteaux, tubes acier de maintien transversaux avec platines pour fixation sur la tour et gousset d'articulation, ancrages par chevilles chimiques, découpe avec assemblages de continuité boulonnés pour limitation du poids de levage à 4T maxi, levage par grue automotrice lourde,

Accès : *par échafaudage de pied*

Levage : *par grue automotrice lourde (inclus dans le poste) / maxi 4T par colis*

Localisation : *4 zones en plan (tours rondes) / pour 4 câbles 7T13S et 7 câbles 12T13S*
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Dispositif d'appui d'angle de frettage par câbles multi-torons

Fourniture et pose de dispositif d'appui pour diffusion des efforts de frettage sur la maçonnerie, compris couchis d'appui en bastaings chêne ép. 100mm mini, mortier ou micro-béton de calage complémentaire sur polyane pour adaptation sur géométrie complexe (selon les zones, prise mer dans la zone de marnage), tubes cintrés en acier S355 galvanisé, ossature de répartition en profils acier soudés S355 type HEA/PRS avec raidisseurs, support par montants profils acier S275 type HEA assemblés par boulonnage sur goussets, pieds de montants d'appui réglables en profils UPN doubles pré-perçés et verrouillés par boulonnage avec platines de pied, platelages d'appui en bastaings chêne croisés connectés par tire-fonds et fixés sur poteaux, tubes acier de maintien transversaux avec platines pour fixation sur la tour et gousset d'articulation, ancrages par chevilles chimiques, découpe avec assemblages de continuité boulonnés pour limitation du poids de levage à 4T maxi, levage par grue automotrice lourde,

Accès : *par échafaudage de pied*

Levage : *par grue automotrice lourde (inclus dans le poste) / maxi 4T par colis*

Localisation : *angle base éperon / pour 4 câbles 7T13S et 7 câbles 12T13S*
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

Dispositif d'appui avec fourrure de frettage par câbles

Fourniture et pose de dispositif d'appui pour diffusion des efforts de frettage sur la maçonnerie, compris couchis d'appui en bastaings chêne ep. 100mm mini, mortier ou micro-béton de calage complémentaire sur polyane pour adaptation sur géométrie complexe (selon les zones), tubes cintrés en acier S355 galvanisé, ossature de répartition en profils acier soudés S355 type HEA/tubes avec raidisseurs, ancrages par chevilles chimiques

Accès : *par cordistes ou échafaudage de pied*

Levage : *par treuil électrique suspendu par câbles : au droit des câbles monotorons*
par grue automotrice lourde (inclus dans le poste) / maxi 4T par colis : au droit des câbles multi-torons

Localisation : *2 zones pour câbles monotorons / Façade est*
4 zones pour câbles multi-torons / Façades nord et est
Selon plans - coupes – façades BET EQUILIBRE STRUCTURES

8. ANNEXES

8.1. ANNEXE 01 / PIECES GRAPHIQUES

8.2. ANNEXE 02 / NOTE TECHNIQUE AEGIS IND 0 DU 27/11/2024