



## Diagnostic structurel des digues du Hérel dans le port de Granville

Eric-Thanh ROHART <sup>1</sup>, Frédéric CAPPELAERE <sup>1</sup>, Christophe NOWAK <sup>1</sup>

1. SITES SAS, 1 avenue Edouard Belin, 92500 Rueil Malmaison, France.

[eric-thanh.rohart@sites.fr](mailto:eric-thanh.rohart@sites.fr) ; [frederic.cappelaere@sites.fr](mailto:frederic.cappelaere@sites.fr) ; [christophe.nowak@sites.fr](mailto:christophe.nowak@sites.fr)

### Résumé :

Le bassin du port de plaisance du Hérel situé à Granville, face à l'archipel de Chausey dans la Baie du Mont Saint-Michel, est protégé des assauts de la mer par un système de digues en béton armé :

- Une digue principale de type caissons en béton armé de type Jarlan
- Une digue secondaire en caissons auto-stables alvéolaires en béton armé

Une troisième digue submersible en béton armé et dotée d'une porte basculante permet de maintenir à flot les eaux du bassin ainsi que ceux du Centre Régional de Nautisme.

Ces ouvrages ont été construits dans les années 1970 et certains ont fait l'objet de travaux de confortement dans les années 1990 suite à la détection de pathologies affectant leur stabilité structurelle.

Eu égard aux enjeux importants liés à l'exploitation du port de plaisance et à la volonté du Maître d'Ouvrage de pérenniser ces ouvrages soumis à un environnement extérieur marin, ce dernier a lancé un diagnostic structurel pour appréhender leur état de conservation et identifier les actions permettant d'assurer leur pérennité sur le long terme. L'établissement du diagnostic structurel a nécessité la mise en œuvre d'un panel d'investigations faisant appel à différentes compétences techniques complémentaires :

- Inspection visuelle détaillée pour établissement d'une cartographie des désordres
- Investigations sur les matériaux existants avec prélèvements et essais en laboratoire
- Reconnaissances structurelles et géométriques
- Relevés topométriques de précision
- Mesures à base d'instrumentation
- Vérification de tenue structurelle par recalculs

La mise en œuvre d'outils spécifiques d'investigations et innovants a permis de pallier aux fortes contraintes d'intervention, liées notamment à l'environnement portuaire et à la dimension importante des ouvrages.

### Mots-clés :

Béton armé, Vieillesse, Diagnostic, Inspection, Investigations complémentaires, Durée de vie résiduelle.

## *Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance*

### **1. Introduction**

Le port de Granville dispose du label Station Nautique et fait partie du Réseau Passeport Escales. Les structures qui accueillent de nombreux visiteurs se doivent donc d'être suivies. Les ouvrages des digues du Hétel dans le port de Granville se composent de 3 structures distinctes voir Figure 1. Les deux premières digues assurent une protection contre la houle du bassin et du port, voir Figures 2 et 3. La troisième retient, quant à elle, les eaux des bassins à flot et du Centre Régional de Granville.

Dernièrement, l'état de la digue principale a préoccupé le Maître d'Ouvrage et les habitués de la promenade André Tible. C'est dans ce contexte que le Maître d'Ouvrage a souhaité faire réaliser un diagnostic structurel des ouvrages de protection afin de statuer sur leur état de conservation et les actions à mener afin d'assurer leur pérennité en lien avec la durée d'exploitation résiduelle souhaitée.



*Figure 1. Vue générale des digues du Hétel.*

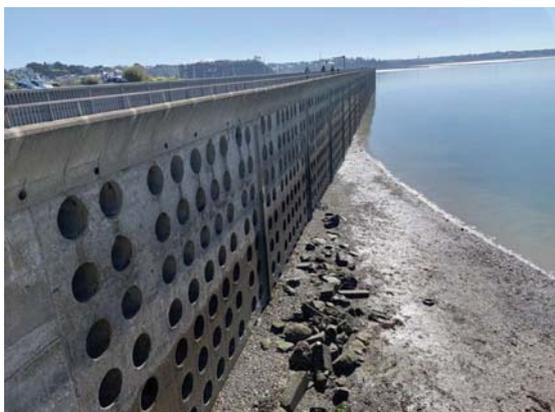


Figure 2. Digue principale de protection en caissons en béton armé de type Jarlan.

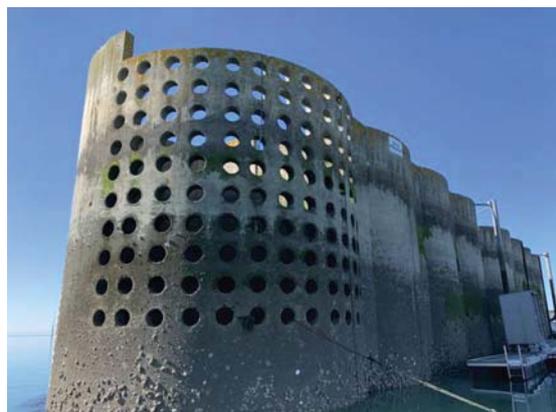


Figure 3. Digue secondaire de protection en caissons auto-stables alvéolaires en béton armé.

## 2. Contenu et méthodologie du diagnostic structurel

### 2.1 Programme de diagnostic

Le programme de diagnostic structurel a été établi sur la base de l'analyse préliminaire des données d'entrée disponibles dans le dossier d'ouvrage (rapports d'expertises antérieures, suivis par instrumentation et relevés topométriques...) et qui met en évidence :

- l'absence de problématiques de comportement structurel de la digue principale, malgré les doutes sur l'état et la fonctionnalité de la précontrainte verticale. Selon les conclusions d'un diagnostic réalisé en 2009, cette précontrainte verticale a pour objectif principal d'assurer la stabilité au glissement des caissons de la digue principale et que cette stabilité pourrait être assurée, dans le cas d'une perte totale de la précontrainte, en modifiant les hypothèses de rugosité à l'interface sol structures ou en présence d'une butée en pied de caisson. L'analyse du dernier rapport de mesures topométriques met en évidence la stabilité des caissons. La dernière mesure datant de 2017, la réalisation d'une nouvelle campagne de mesures topométriques a été préconisée afin de confirmer ce point. Des fouilles en pied des caissons de la digue principale ont également été prescrites afin de statuer sur la présence ou non d'une butée en pied.
- que les problématiques historiques d'assises des caissons des digues secondaires, qui ont généré l'apparition de fractures, se sont manifestement stabilisées suite aux travaux de confortement réalisés en 1993 et 1994. A l'instar de la digue principale, la réalisation d'une nouvelle campagne de mesure des jauges de suivi de la fissuration a été préconisée afin de valider cette stabilisation de l'ouverture des fractures. La réalisation d'investigations géotechniques au niveau de l'assise des caissons ne semble pas nécessaire en cas de confirmation de la stabilité de

## *Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance*

comportement des caissons de la digue secondaire. Il a été préconisé par ailleurs la réalisation d'une campagne de détection des armatures, ces dernières semblant absentes au niveau des fractures lors d'un constat effectué lors d'une pré visite des ouvrages.

Eu égard à la volonté du Maître d'Ouvrage de pérenniser les ouvrages, il est apparu nécessaire de réaliser une campagne d'investigations complémentaires pour caractériser le vieillissement des matériaux :

- Prélèvements d'échantillon de béton pour essais en laboratoire pour :
  - identifier la pénétration de polluants susceptibles de provoquer une dépassivation des armatures (carbonatation, chlorures), avec mesures de pH,
  - réaliser des mesures de porosité afin de statuer sur la capacité du béton à freiner la pénétration des polluants au niveau des armatures ;
- Mesures d'enrobages par sondages, afin de pouvoir comparer les profondeurs de pénétration des polluants avec les profondeurs des armatures ;
- Mesure de potentiel électrique des armatures par sondages, afin d'identifier les probabilités d'une activité de corrosion ;
- Auscultation sonore du béton afin de valider l'homogénéité du béton constitutif des ouvrages et pouvoir extrapoler les résultats des investigations listées ci-avant.

Le diagnostic structurel proposé comprenait également la mise en œuvre en préalable aux investigations complémentaires d'une inspection visuelle détaillée dont l'objectif visait à relever l'ensemble des désordres apparents sur les structures des ouvrages

### 2.2 Contraintes principales et mesures mises en œuvre

Les principales contraintes identifiées lors de la préparation et la mise en œuvre du diagnostic structurel sont les suivantes :

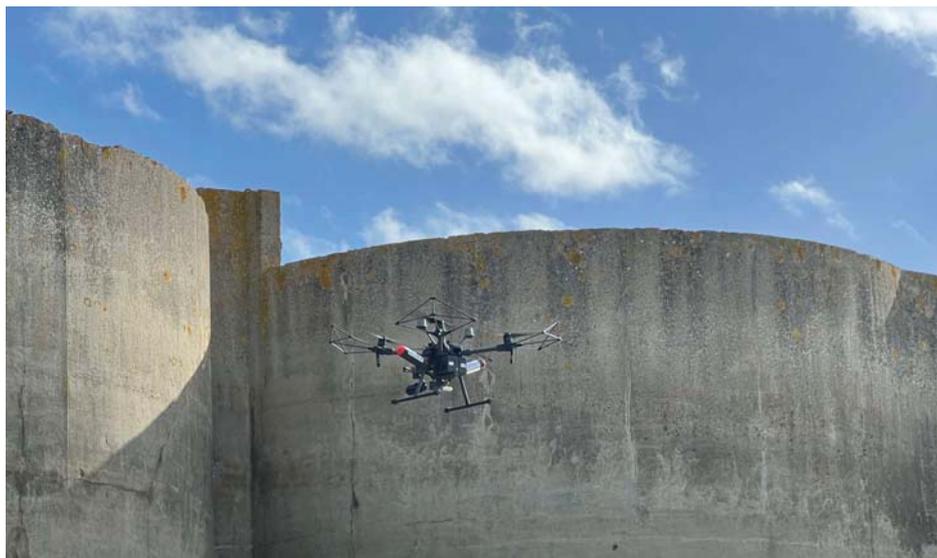
- Maintien de l'exploitation des ouvrages lors des investigations (circulation des promeneurs sur la digue principale et transit des bateaux de plaisance) ;
- Ouvrages de dimensions importantes avec surfaces de parement béton conséquentes à expertiser ;
- Difficultés d'accès, en raison de la hauteur des ouvrages notamment et de la présence de vase, voir Figure 4 ;
- Présence de parements immergés en permanence ;
- Prise en compte des phénomènes de marée (calage des interventions lors des épisodes de grandes marées pour maximiser la surface de parements émergés) et des conditions météorologiques ;
- Multiples compétences techniques requises pour la réalisation du diagnostic, avec modes opératoires spécifiques associés ;
- Impossibilité d'utiliser du matériel électrique classique alimenté sur 220V en raison des risques d'électrocution.



*Figure 4. Vue de l'intérieur de la digue principale.*

Les solutions suivantes ont été mises en œuvre lors de la phase de préparation des investigations en lien avec ces contraintes :

- Utilisation de drones aériens pour inspection visuelle par technique photogrammétrique avec prises de vue haute résolution (génération d'un modèle 3D et inspection au bureau sur orthophotographies), voir Figures 5 et 6 ;



*Figure 5. Inspection visuelle aérienne par drone.*

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

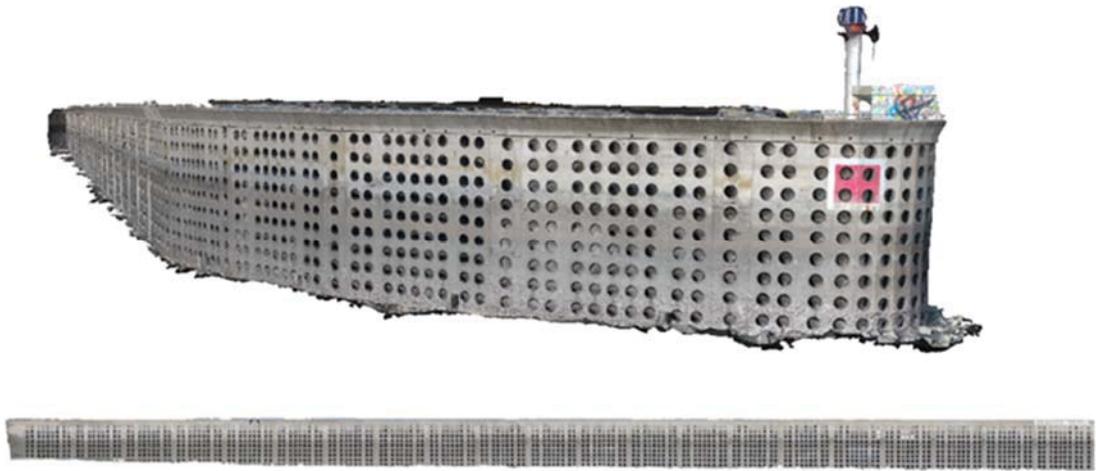


Figure 6. Modèle 3D et orthophotographie digue principale côté mer.

- Recours à une équipe de scaphandriers pour l'inspection des parements des ouvrages immergés en permanence ;
- Utilisation de tablettes numériques protégées contre les intempéries (possibilité d'utilisation sous la pluie) lors des relevés sur site pour optimiser et fiabiliser l'élaboration des rapports d'expertise, voir Figure 7 ;



Figure 7. Exemple de rendu de relevé de désordres sur tablette numérique.

- Élaboration d'une planification détaillée des interventions, mise à jour quotidiennement suivant les aléas rencontrés, météorologiques notamment ;
- Communication étroite avec la capitainerie lors des interventions sur site ;
- Utilisation de carotteuses sur batteries, voir Figure 8 ;
- Mise en œuvre d'une pelle mécanique sur chenille marais.



Figure 8. Prélèvements béton avec carotteuse sur batardeau.

### 3. Principaux résultats du diagnostic et préconisations d'actions

Le diagnostic réalisé a permis de mettre en évidence que les structures en béton armé des digues principale et secondaire sont dans un état de dégradation avancé, présentant des désordres liés au vieillissement des matériaux, au manque d'entretien et par des défauts de mise en œuvre. Ce dernier point, combiné à l'exposition des ouvrages à un milieu agressif, engendre des épaufrures, des éclats béton avec aciers apparents provoqués par la corrosion des armatures.



Figure 9. Fracture avec aciers sectionnés sur digue secondaire et instrumentée pour suivi de son ouverture.

Il a été confirmé par ailleurs la stabilisation des problématiques historiques d'assises des caissons des digues secondaires suite aux travaux de confortement réalisés dans les années 1990, voir Figure 9.

## Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

A l'issue du traitement et de l'interprétation des résultats des différentes investigations réalisées (voir Tableau 1), une durée de vie résiduelle de 10 ans a été estimée pour ces ouvrages sans mise en œuvre de travaux de réhabilitation :

- Digue principale : 20 à 25 ans ;
- Digue secondaire : 10 ans ;
- Digue submersible : 15 à 20 ans.

Tableau 1. Synthèse des résultats des investigations complémentaires réalisées sur la digue principale.

Essais réalisés	Résultats	Interprétations
Mesures d'enrobages	Enrobages variant de 27.4 à 78.2 mm, avec une moyenne à 69 mm.	La valeur minimale de 50 mm est globalement respectée, bien que certains enrobages soient inférieurs, avec, par exemple, 27.4 mm côté port, entre P28-P29 (marée haute).
Carbonatation du béton	La profondeur du béton carbonaté est comprise entre 2 et 6 mm.	La carbonatation du béton n'a globalement pas atteint les armatures situées au minimum à 27.4 mm sur l'ouvrage. Pas de risque de corrosion par le béton carbonaté.
Teneur en ciment du béton	Valeurs de 338 kg/m <sup>3</sup> , soit 15.3 % de la masse de béton	Ciment de type CEM I
Chlorures libres et totaux dans le béton	Valeurs comprises entre 0.017 et 0.137 % de la masse de béton dans les zones de premier lit d'armature	La teneur en chlorures totaux est parfois supérieure à 0.061 % aux profondeurs des armatures, avec 0.137 % côté port entre P28-P29 marée haute. Il existe donc un risque de corrosion des armatures induite par les ions chlorures
Sulfates dans le béton	Valeurs comprises entre 0.37 et 0.50 % m/m	Le taux des sulfates est $\leq 0.54$ %. Pas de risque de pollution du béton liée aux sulfates
Porosité du béton	La porosité du béton a été mesurée entre 15.1 et 17.5 %	La porosité du béton est supérieure à la recommandation de 11 % pour une classe d'exposition XS3. Sa capacité à freiner la pénétration des agents agressifs est donc insuffisante.
Qualité du béton	Les valeurs de célérité sont comprises entre 1 582 et 3 513 m/s, avec une moyenne à 2 247 m/s.	Le béton est globalement homogène et de mauvaise qualité.
Potentiel de corrosion des armatures	Les valeurs de potentiel de corrosion varient entre - 655 et - 59 mV, avec une moyenne des médianes à - 459 mV	Les armatures présentent une activité de corrosion certaine.
Butée en pied de la fondation	Remblai graveleux côté port et ensemble sableux côté mer par observation indirecte.	Absence de butée en pied.
Points de contrôles topométriques	Point P : 9 en dehors du seuil d'étude : écart supérieur à 10 mm avec un $\Delta Y = - 11$ mm.	Ouvrage globalement stable, la moyenne des écarts en planimétrie étant de 5 mm, correspondant à la zone d'incertitudes de la mesure.

Un programme d'actions a été élaboré et proposé au Maître d'Ouvrage suite au diagnostic structurel, qui comprenait notamment :

- la poursuite des actions de surveillance du vieillissement et du bon comportement mécanique des ouvrages, avec indication de la périodicité associée (inspections visuelles, suivi géométrique par topographique, suivi de l'ouverture des fractures...),
- l'identification des travaux de réparation permettant de rallonger la possibilité d'exploitation des ouvrages au-delà de la durée de vie résiduelle estimée (doublement de la durée de vie résiduelle pour la digue principale et la digue submersible).

Pour la digue secondaire, son état de dégradation avancé et la faible durée de vie résiduelle ont conduit le Maître d'Ouvrage à la décision de ne pas engager de travaux lourds de réparation et de programmer sa reconstruction à l'horizon 10 ans.

#### **4. Conclusion**

La décision par le Maître d'Ouvrage de mettre en œuvre un diagnostic structurel des ouvrages composant les digues du Hérél dans le port de Granville a permis de statuer sur l'état de conservation des ouvrages et sur leur durée de vie résiduelle estimée sans investissements de pérennisation. Cet état des lieux précis a permis d'orienter les choix stratégiques du Maître d'Ouvrage et servira de référence pour le suivi de l'évolution éventuelle des désordres lors des campagnes ultérieures de surveillance.

Un programme détaillé de travaux a été élaboré et proposé au Maître d'Ouvrage pour les ouvrages qu'il a souhaité pérenniser. Ce programme intègre une priorisation des réparations à effectuer, ainsi que la fourniture d'estimations financières et de plusieurs options de réhabilitation, en lien avec la durée d'exploitation envisagée pour chacun des ouvrages composant le système de digues.

#### **5. Références bibliographiques consultées**

AFGC, ASSOCIATION FRANCAISE DE GENIE CIVIL (2005). *Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton*, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 555 p.

AFGC-CFA, ASSOCIATION FRANCAISE DE GENIE CIVIL/CENTRE FRANCAIS DE L'ANTICORROSION (2003). *Réhabilitation du béton armé dégradé par la corrosion*, 107 p.

ENPC - COLLECTIF PRESSES DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES (2007). *Grandubé Grandeurs associées à la durabilité des bétons*, Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées, 438 p.

HAUCHECORNE A. (2011). *Altération du béton en site maritime*, CEREMA (ex CETMEF), 70 p.

## *Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance*

LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES (1996). *Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton*, 76 p.

THAUVIN B., ROUXEL N. (2008). *Pathologie des ouvrages portuaires : méthodes d'investigation*, CEREMA (ex CETMEF), 90 p.