



ARTICLES

MEDITERRANEAN DAYS 2023

by PIANC



25, 26 and 27 october 2023

Sète





Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)

Index des articles (45)

Transition numérique et énergétique (4)

ID Océan-France	Steven Le Bars	Seabim : le jumeau numérique appliqué à la construction et à la gestion patrimoniale de digue à talus	4
Sener-Spain	Jose Luis Monso	The Way to Digitization and the Integration of Intermodal Services in Ports	14
Autorité portuaire mer Tyrrhénienne-Italie	Elena Valentino	Climate change minimization in port developments located in sensitive and complex areas	23
Balearic Port-Italy	Jose Martin Jimenez	Cold ironing facilities in the general interest	31

Ports de plaisance (1)

AIPCN RecCom	Laurent Monsaingeon	Les publications de l'AIPCN/RecCom et leur utilité pour les ports de plaisance	pas d'article
Université de Bologne	Marco Pellegrini	The innovative ejectors' plant technology for sediment management in harbours	40
Union des ports de plaisance de la région PACA	Véronique Turrel	Ports propres et création d'une norme ISO	pas d'article
Port de Sète Sud de France	Fabien Luais	La transition numérique des ports de plaisance	pas d'article
Vuentic-Iframara-BV-Belgique	Kenneth Willems	The application of early contractor involvement in Mediterranean marina projects	pas d'article

Innovations pour des ports durables et résilients (6)

Ecoconcrete-Espagne	Phil Leblanc	Blue Standards for nature-inclusive port infrastructure	51
Arcelor-Luxembourg	Joao Martins	Construction of sustainable quay walls	58
Université de Naples 2-Italie	Margherita Cicciglione	Extreme events and importance of their identification : the study case of Salerno port	69
BRLi-France	Franck Rangognio	Modernisation et restauration innovantes des écluses limitant les interruptions de navigation : exemple de Méricourt	77
BRLi-France	Pierre-Yves Massy	Les avantages de l'utilisation de diffuseurs dans les travaux de remblais hydrauliques au port de Dunkerque	87
Artelia-France	Jean-François de Calonne	Quelles solutions face au changement climatique pour le port unique de l'île Maurice ?	95



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

-

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)

Intégration urbaine et logistique des ports (7)

Université de Naples-Italie	Vittoria Puzone	Dredging and extension works of the port of Salerno	107
Siport 21-Espagne	Lourdes Pecharroman	Evaluation of port facilities for transport operations of windmills components	115
Suez Consulting-France	Vasileios Afentoulis	Performance-based design of mooring/berthing dolphin structure considering geotechnical and structural constraints under offshore load conditions	123
Arcelor-Luxembourg	Thomas Hilbert	Smart Sheet Piles	133
Université de Naples 2-Italie	Margherita Ciccaglione	Vibro-replacement technique for the seabed of Salerno port	141
Aktis Hydraulics-The Netherlands	Lutz Schweter, Luis Lopez	The behaviour of a moored ship in wind : the difference between a static and dynamic mooring analysis	149
Deutsche Marina Consult-Allemagne	Heiner Haas	City-port integration under aspects by nautical tourism and urban development	158

Port Planning (3)

Keynote speech Italy	Francesco Messineo	New perspectives for the planning of port cities in Italy	164
IADC Netherlands	Ayya Shahat	Dredging for sustainable infrastructure	172
Port la Nouvelle, France	Roman Stega, Manuela Scarsi	L'extension du port de Port La Nouvelle	184



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)

Outils de conception portuaire (6)

Port de Venise-Italy	Paolo Menegazzo, Andrea Pedroncini	Malamocco-Marghera Navigation Channel(Venice Lagoon); study of operational and structural solutions to achieve a sustainable navigation	195
Bekaert-France	Chiara Minoretti	Chaussées portuaires durables : utiliser moins pour plus longtemps grâce aux fibres métalliques	203
Artelia-France	Jérôme Mercier	Déploiement d'un smart grid portuaire bas carbone pour le terminal de la pointe des Grives	212
Sistema Portuale Mar Tirreno Settentrionale-Italie	Francesco Iberto de Bari, Manuela Scarsi	Navigating the Future: Analysing the Effects of Autonomous Ships on Mediterranean Port Operations and Safety	221
Université Gustave Eiffel-France	Jean-Bernard Kovarik	Caractériser les actions météo océaniques sur des durées longues avec les Eurocodes	230
Artelia-France	Franck Mazas	Prise en compte de la remontée eustatique du niveau moyen dans les analyses conjointes houle-niveau pour le dimensionnement des ouvrages portuaires	238

Exemples de conception portuaire (6)

PHD-Italy	Serena d'Amora	Efficiency and flexibility in Italian port planning by means of the Technical Functional Adaptation tool	248
Trelleborg-EAU/The Netherlands	Marco Gaal	Recommendations for fenders PIANC WG 211	258
Cerema-France	Tiffany Desbois	Détermination des impacts environnementaux d'une rénovation d'écluse en vue d'une écoconception des ouvrages	264
Cerema –France	Perrine Vermeersch	Adaptation au changement climatique du Port Atlantique La Rochelle	276
Universit. Aveiro-Portugal	Rita Pombo	Container ports planning-key factors to boost resilience	284
ESID Brest-France	Alexandre Lemaire	Adaptation et modernisation du port militaire de Brest face à l'arrivée des nouveaux navires de la Marine nationale	292



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

-

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)

Transition numérique (7)

Université de Strasbourg - France	Hélène Macher	Création de jumeaux numériques d'infrastructures existantes et suivi d'ouvrages : état de l'art des techniques	302
Grand port maritime de Bordeaux-France	Fabrice Klein, Vincent Lalire	Projet Giros-des jumeaux numériques pour un développement durable de l'estuaire de la Gironde	310
Balearic Port Authority-Spain	Jorge Martin Jimenez	Air quality monitoring system and smart environmental platform in the port of Balearic islands	320
Balearic Port Authority-Spain	Cristina Albuquerque Otero	Proactive detection of pollution episodes with AI by exploiting in-situ data , satellite data and port activity	328
IH Cantabria-Spain	Antonio Tomas	Application of machine learning techniques to assist design,construction and operation of port	337
IH Cantabria-Espagne	Gabriel Diaz Hernandez	Developing a wave prediction module for sustainable port operations and energy harvesting	345
Université Aveiro- Portugal	Diogo Oliveira	BIM Methodology applied to maritime works	354

Solutions techniques retenues par quelques ports méditerranéens (5)

Laboratoire d'études marines-Algérie	Meriem Hadji	proposition d'une solution alternative de tablier à poutres précontraintes pour la conception d'un appontement minéralier du port de Jenjen, Jijel, Algérie	355
Univ. Tech Hambourg-Allemagne	Andreas Mohr	Impact of GHG initiatives in the container handling equipment market	363
Sener-Espagne	Eugenia Poveda Santiago	Aménagement du complexe industrialo-portuaire de Nador West Med	371
Suez consulting-France	Fabrice Javel	Plus-value écologique des cuvettes rocheuses artificielles intégrées aux ouvrages maritimes : premiers retours d'expérience en Atlantique et Méditerranée	381
Univers. Regio Calabria-Italy	Felice Arena	The new U-oscillating water column breakwater of the commercial harbour of Salerno for the wave energy conversion	397

Auteur principal : LE BARS – Steven – steven.lebars@idocean.re – ID OCEAN – Bât 4puissance3
ZA Chavanon 2, 43120 Monistrol-Sur-Loire – France

Co-auteurs : LAUNAY – Timothée – timothee.launay@idocean.re – ID OCEAN – Bât 4puissance3
ZA Chavanon 2, 43120 Monistrol-Sur-Loire – France

Mots clés/Key words : jumeau numérique, digue, gestion patrimoniale – digital twin, breakwater, asset management

SEABIM®, le jumeau numérique appliqué à la construction et à la gestion patrimoniale de digue à talus

SEABIM®, the digital twin for rubble-mound breakwater construction and asset management

Résumé de l'article: Les digues à talus de protection portuaire sont des ouvrages qui ont une importance stratégique pour l'exploitation portuaire et sont soumis à des sollicitations de houle conséquentes. Dans ce contexte, il est nécessaire d'assurer que la construction de la carapace externe soit la plus fiable possible selon les règles de pose des concepteurs. De plus, des auscultations régulières sont nécessaires sur toute la durée de vie de la digue. Ces inspections permettent d'anticiper les actions de maintenance préventive afin d'éviter toute rupture partielle qui pourrait entraîner des conséquences économiques majeures.

SEABIM® est un processus numérique breveté qui génère un modèle 3D fiable et complet d'une carapace préfabriquée. L'algorithme retrouve dans un nuage de points haute résolution (bathymétrie, LiDAR, photogrammétrie) la position et l'orientation des blocs béton qui protègent le talus. Le modèle 3D obtenu permet de vérifier l'imbrication des éléments, d'identifier les blocs cassés par comparaison entre le nuage de points et le jumeau numérique et d'appliquer des filtres automatisés de contrôle de placement. Grâce à la superposition de modèles 3D réalisés à des dates successives, le mouvement de chaque bloc est vectorisé. L'outil s'applique tant pour des projets à taille réel que pour des essais de modèle physique en laboratoire.

Cet outil a été appliqué sur de nombreux projets en France et à l'export depuis 2019 tant en suivi de construction neuve qu'en phase de gestion patrimoniale (Nouvelle Route du Littoral, Calais Port 2015, Aberdeen, Grand Port Maritime de La Réunion etc). En complément du processus de modélisation, des exemples d'application concrets sont présentés.

De plus, SEABIM® intègre un module de segmentation de nuage de points pour les carapaces en enrochements naturels. Ainsi, chaque enrochement est isolé afin de calculer ses caractéristiques géométriques (diamètre nominal, forme, densité de pose) selon les recommandations du guide des enrochements et de suivre son déplacement temporel.

Enfin, un module complémentaire permet la création du modèle 3D de carapace à l'avancement par le constructeur. Cet outil d'aide à la pose garantit un contrôle continu objectif de la qualité de placement et d'imbrication des blocs afin de réaliser une construction la plus efficace et robuste possible.

Article's abstract : Breakwaters are strategically important structures for coastal activities and are subject to considerable wave loads. In this context, it is necessary to ensure that the construction of the outer layer is as reliable as possible, in accordance with the designers' placement rules. In addition, regular inspections are necessary throughout the life of the breakwater. These inspections enable to anticipate preventive maintenance actions in order to avoid any partial failure that could have major consequences.

SEABIM® is a patented digital process that generates a reliable and complete 3D model of breakwater precast concrete armor units. The algorithm uses a high-resolution point cloud (bathymetry, LiDAR, photogrammetry) to determine the position and orientation of the concrete blocks protecting the embankment. The resulting 3D model can be used to check the interlocking of elements, identify broken blocks by comparing the point cloud with the digital twin, and apply automated placement control filters. By superimposing 3D models produced at successive dates, the movement of each block is vectorized. The tool can be used for both full-scale projects and physical model testing in laboratory.

This tool has been applied to numerous projects in France and abroad since 2019, both in the monitoring of new construction and in the asset management phase (Nouvelle Route du Littoral, Calais Port 2015, Grand Port Maritime de La Réunion, etc.). In addition to the modelling process, concrete examples of applications are presented.

SEABIM® also incorporates a point cloud segmentation module for natural riprap armours. Each rock is isolated in order to calculate its geometric characteristics (nominal diameter, shape, laying density) in accordance with the recommendations of the rock manual, and to monitor its movement over time.

Finally, an additional module enables the marine contractor to create a 3D model of the armour as the work progresses. This installation aid guarantees continuous, objective control of the quality of the placement and interlocking of the blocks, to ensure that the construction is as efficient and robust as possible.

Article :

1. Introduction et enjeux

Les digues maritimes à carapace préfabriquée constituées d'une seule couche (ACCROPODE™, XBLOC®, CORE-LOC™ etc) nécessitent une pose parfaitement maîtrisée selon les règles du concepteur afin de résister aux houles de conception sur toute la durée de vie de l'ouvrage. Bien que ces

ouvrages soient résistants à des sollicitations plus fortes que des digues en enrochements, il est nécessaire d'en assurer une inspection régulière car l'évolution d'un dommage est plus rapide que pour des enrochements naturels [2].

Les inspections de ces digues sont historiquement réalisées par des visites sous-marines exécutées par des plongeurs professionnels. Néanmoins, ce type d'inspection est très long et donc coûteux pour des digues de grand linéaire. De plus l'inspection réalisée uniquement sur la base de la vidéo s'avère subjective en fonction de la façon de filmer du scaphandrier et très difficile à analyser pour les ingénieurs en charge du contrôle car le géoréférencement des anomalies est approximatif et le visionnage de vidéos est chronophage.

C'est dans ce cadre qu'un procédé numérique qui permet de créer un modèle 3D complet de la carapace de digue à partir de données haute résolution simples à obtenir de type nuage de points a été développé.

2. Article

2.1 Création du modèle 3D

La première étape consiste à réaliser un scan de la carapace afin d'obtenir un nuage de points haute résolution. Pour la partie aérienne de l'ouvrage, une photogrammétrie ou lasergrammétrie drone peut être réalisée à marée basse. Pour la partie sous-marine, un scan acoustique multifaisceaux doit être réalisé à marée haute (Figure 1).

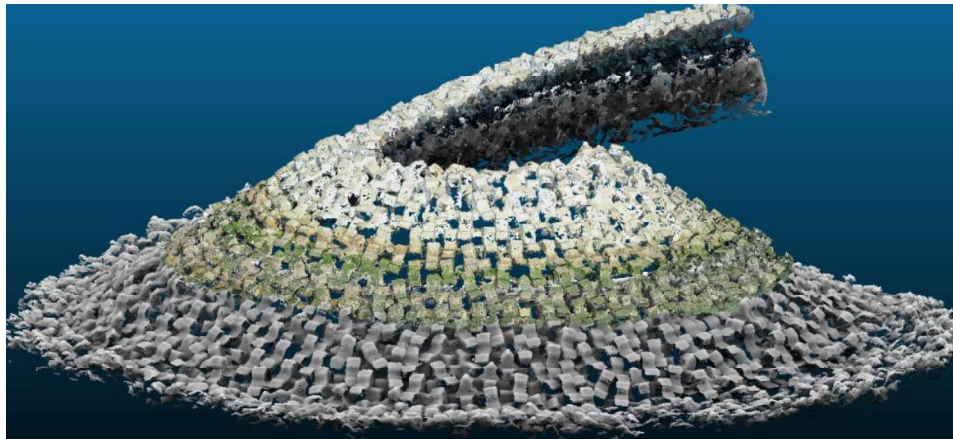


FIGURE 1 – SCAN BATHYMETRIQUE ET PHOTOGRAMMETRIQUE DE LA DIGUE DU PORT DE CALAIS

L'algorithme de reconnaissance automatisée de forme 3D est alors appliqué sur le nuage de points afin d'identifier la position et l'orientation de tous les blocs (Figure 2). On obtient donc un modèle 3D dans lequel est présent chaque élément de la carapace de manière complète alors que le nuage de points levé initialement ne permet de visualiser que la surface externe visible du bloc.

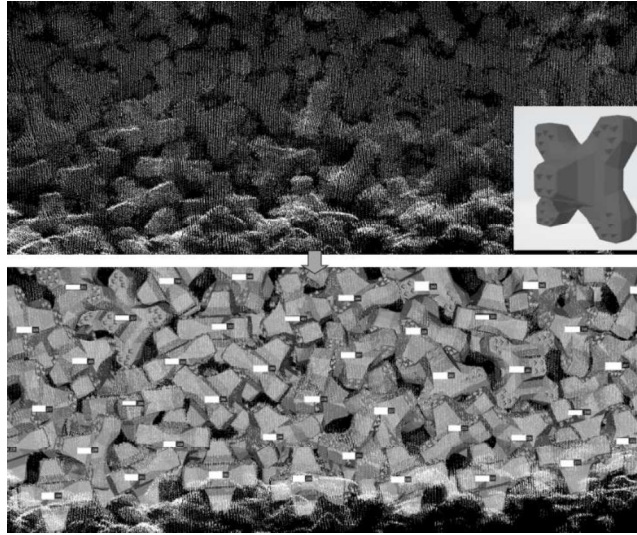


FIGURE 2 – PRINCIPE D’APPLICATION SUR UN NUAGE DE POINTS

La zone immergée proche du niveau d’eau est toujours une zone blanche sans données pour la bathymétrie, notamment à cause des bulles causées par les vagues et des réflexions acoustiques de la surface libre. Il n’est cependant pas nécessaire de scanner l’intégralité d’un bloc pour en retrouver la position. Un nuage de points partiel du bloc suffit à la valider, ce qui permet de modéliser l’intégralité de la carapace en zone intertidale même dans des zones à faible marnage (Figure 3).

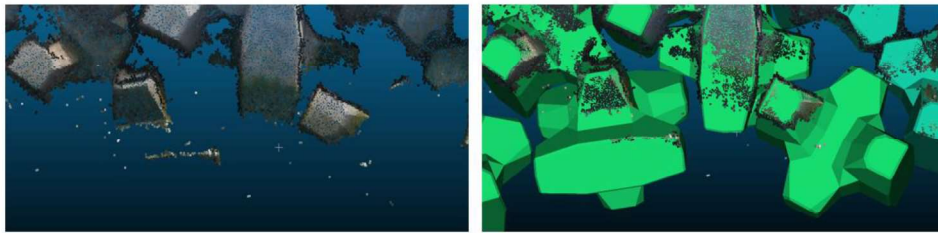
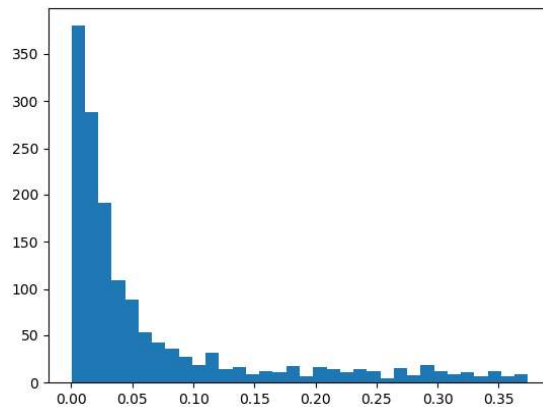


FIGURE 3 – DETECTION DE BLOC EN ZONE INTERTIDALE A PARTIR D’UN NUAGE PARTIEL

Pour chaque bloc recalé par l’algorithme, la distribution de la distance entre les points au voisinage et le modèle 3D du bloc est calculée (Figure 4). Des critères statistiques sont utilisés pour filtrer automatiquement les blocs valides.



*FIGURE 4 – HISTOGRAMME DE REPARTITION DE DISTANCE - ABSCISSE : DISTANCE DU POINT AU BLOC
RECALE /ORDONNEE : NOMBRE DE POINTS PAR TRANCHE DE DISTANCE (TOUS LES 1 CM)*

2.2 Contrôles automatiques de pose de la carapace

De nombreux filtres de contrôle de la qualité de pose des blocs de carapace ont été développés afin d'assister les entreprises de construction dans le contrôle qualité de leurs opérations, notamment :

- Calcul du nombre de contacts d'un bloc avec ses voisins
- Vérification des blocs considérés en dehors du profil moyen qui présentent un risque d'extraction de la carapace
- Vérification de la densité de pose des blocs
- Analyse de l'orientation relative des blocs voisins afin de respecter une pose variée et en losange (un bloc doit toujours reposer sur 2 blocs de la ligne inférieure)
- Détection des trous dans la carapace par lesquels un bloc de sous-couche pourrait être extrait

L'ensemble de ces filtres sont représentés par des codes couleurs dans le modèle 3D (Figure 5) afin que l'ingénieur en charge de l'analyse de l'ouvrage identifie rapidement les zones nécessitant un contrôle accru.

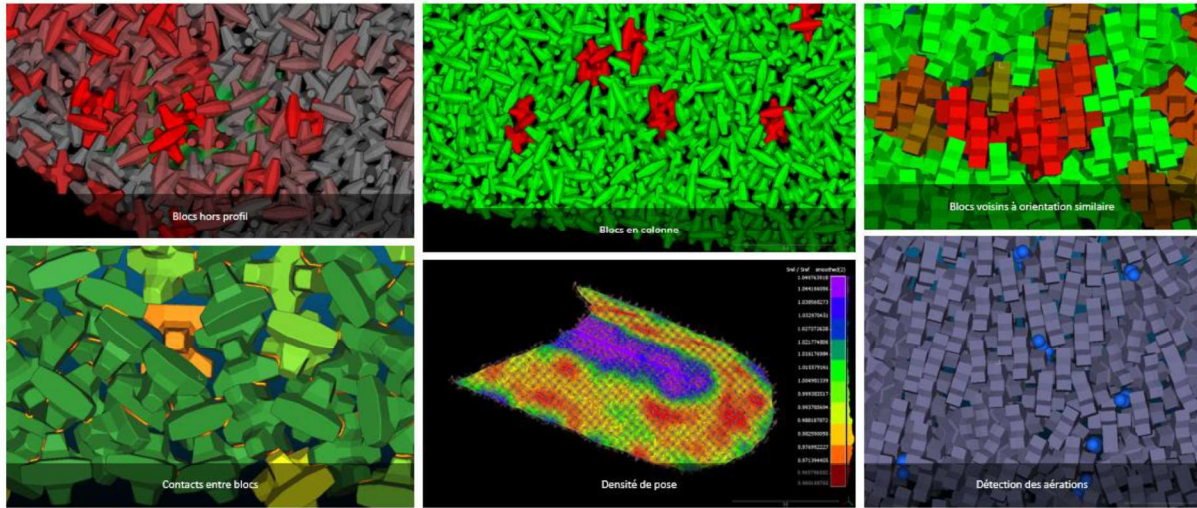


FIGURE 5 – FILTRES DE CONTROLE DE POSE DES BLOCS

2.3 Contrôles automatiques de pose de la carapace

En comparant le modèle 3D théorique généré de la carapace et le nuage de points original, il est possible d'identifier des modifications de la forme théorique 3D des blocs donc notamment ceux qui se sont cassés à la suite de contraintes mécaniques subies pendant l'installation ou par des efforts de houle. On réalise pour cela un nuage de points différentiel sur lequel chaque point du nuage initial est colorisé selon sa distance au modèle 3D généré. Ainsi, une zone cassée du bloc présentera une distance au modèle 3D plus grande et apparaîtra donc en rouge sur le différentiel (Figure 6).

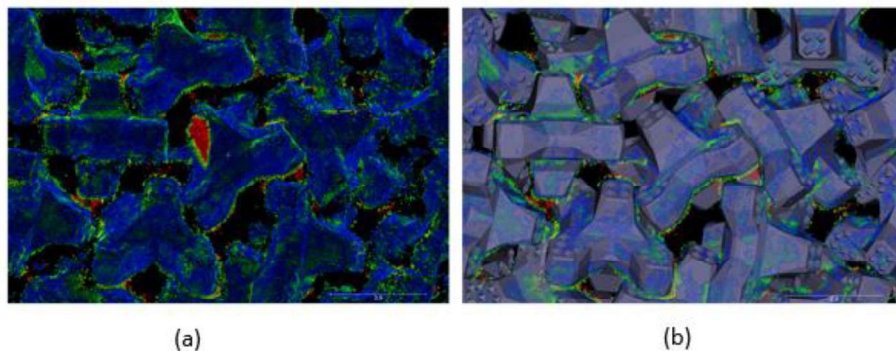


FIGURE 6 – (A) NUAGE DIFFERENTIEL DU BLOC CASSE, (B) MODELE 3D THEORIQUE DU BLOC

Enfin, la réalisation d'un modèle 3D à intervalle régulier ou après un évènement météo-océanique majeur permet de suivre dans le temps les mouvements unitaires de chaque bloc de carapace à une échelle sub-décimétrique (la précision du modèle 3D est directement liée à la précision des scans réalisés). En effet, le mouvement de chaque bloc peut être vectorisé en comparant sa position sur l'état

initial et l'état final. Cela permet d'identifier des effets de tassement, de grand glissement, d'effondrement localisé ou d'extraction d'un bloc (Figure 7).



FIGURE 7 – VISUALISATION COLORISEE DU MOUVEMENT DE CHAQUE BLOC ENTRE DEUX LEVES ET VECTORISATION DU DEPLACEMENT

2.4 Application pour les essais sur maquette physique

Tout comme à l'échelle réel, il est possible de réaliser le modèle 3D de la carapace miniaturisée d'un modèle physique réalisé en laboratoire dans le cadre d'une étude de conception. Le scan est alors réalisé une fois le bassin vidé à partir d'un scanner statique LiDAR ou d'une photogrammétrie statique calibrée par des points de contrôle intégrés à la maquette. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir identifier les mouvements de bloc (rocking, tassement etc) à la suite de chaque série de vague envoyée sur la maquette (Figure 8).



FIGURE 8 – VISUALISATION DU DEPLACEMENT DES BLOCS SUR MAQUETTE PHYSIQUE

2.5 Segmentation d'engrèvements naturels

L'algorithme de détection de forme 3D n'est pas applicable sur une digue en engrèvements naturels car la forme de chaque élément est variable et non régulière. Afin de proposer une solution fiable pour le contrôle de sous-couche de carapace ou de carapace en engrèvements naturel, un algorithme de

segmentation a été développé. Il permet d'isoler chaque bloc individuellement pour en faire le suivi et calculer les caractéristiques générales de la digue (Figure 9).

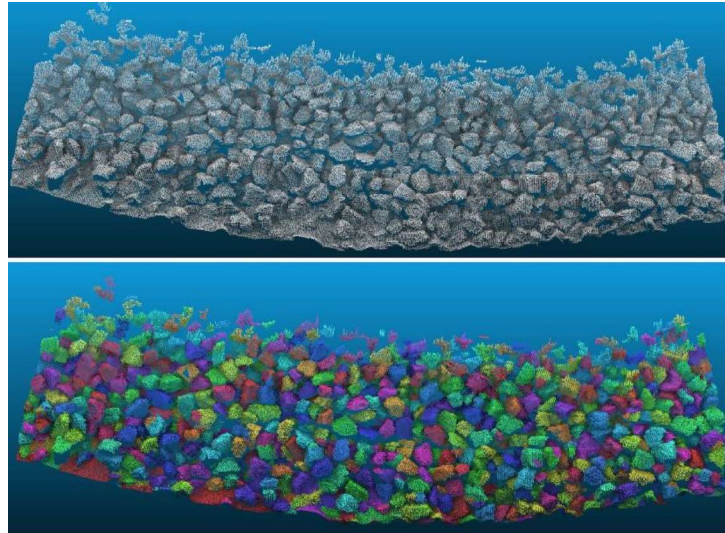


FIGURE 9 – SEGMENTATION D'UN NUAGE DE POINTS BATHYMETRIQUE

A partir de la segmentation, il est possible de calculer des caractéristiques mathématiques de la couche d'enrochements selon les critères de calcul du métier [1] tel que le diamètre apparent de chaque bloc ou la densité locale (Figure 10).

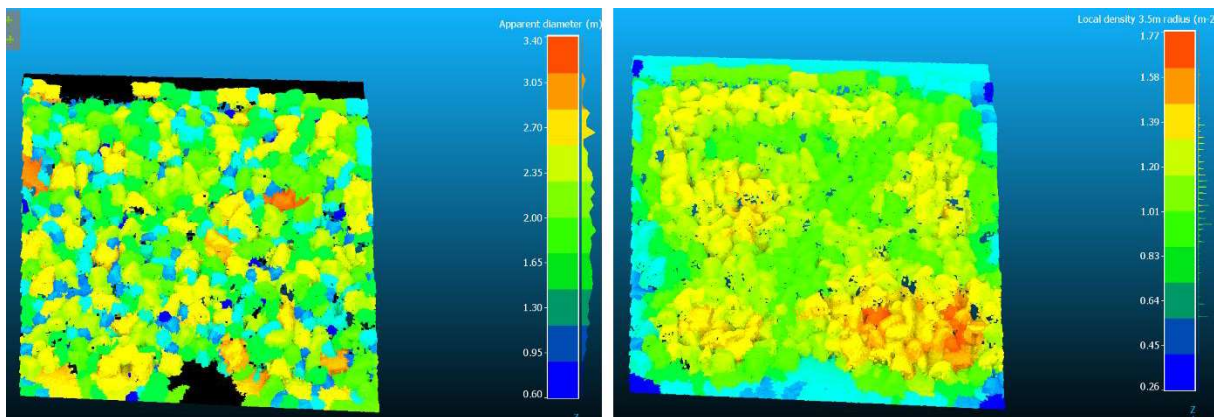


FIGURE 10 – FILTRE DIAMETRE APPARENT A GAUCHE, DENSITE LOCALE A DROITE

2.6 Outil d'aide à la pose de bloc

Un outil d'aide à la pose de bloc pour les entreprises de construction maritime a été développé à partir de SEABIM® en partenariat avec la société américaine TELEDYNE MARINE spécialisée en fourniture de capteurs et logiciels pour l'hydrographie. L'outil permet de réaliser le modèle 3D tel que construit de la carapace à l'avancement de la construction.

Pour ce faire, un scan bathymétrique est réalisé après la pose de chaque bloc à l'aide d'un sondeur multifaisceaux monté sur une tête rotative (Figure 11) placé sur une barge ou sur une pelle dédiée aux activités de scan. Le logiciel spécialisé en acquisition de données nuage de points et en suivi de construction de digues TELEDYNE PDS CONSTRUCTION (Figure 11) est utilisé pour la visualisation du modèle 3D en temps réel.

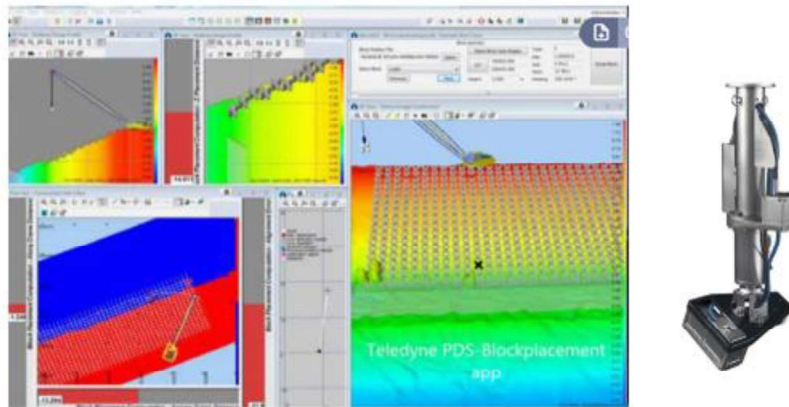


FIGURE 11 – LOGICIEL TELEDYNE PDS CONSTRUCTION ET SCAN ROTATIF MOTIONSCAN

Le nuage de points est enregistré sur le logiciel spécialisé PDS qui transmet automatiquement à l'algorithme SEABIM les données. La position exacte du bloc dans le nuage est alors identifiée par l'algorithme et renvoyée à PDS afin d'en faire l'affichage pour le grutier en charge de la pose (Figure 12).

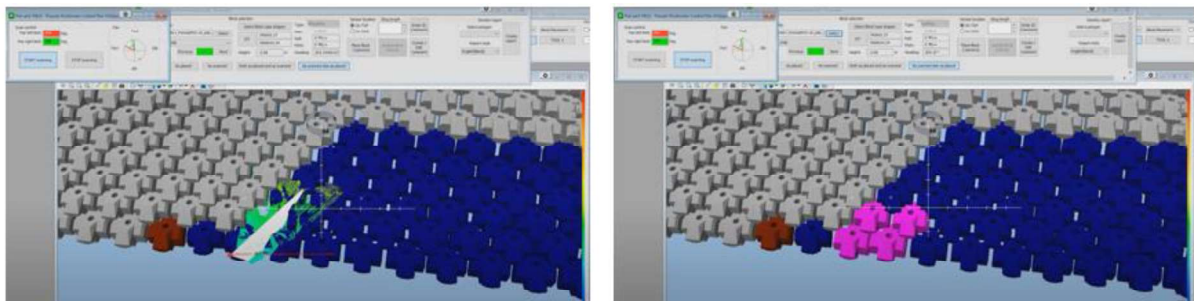


FIGURE 12 – VISUALISATION DU SCAN A GAUCHE – POSITION DES BLOCS RETROUVES EN ROSE A DROITE

Un logiciel de post-traitement nommé SEABIM Editor a été développé afin que l'entreprise puisse ensuite exporter le modèle 3D de PDS et le mettre à jour pour le contrôle qualité de la pose (fusion de modèles, modifications, renommage des blocs, application des filtres de contrôle, export).



FIGURE 13 – RENDU 3D FINAL APRES POST-TRAITEMENT SEABIM EDITOR

3. Conclusion et perspectives

La numérisation 3D de digue est un outil innovant et versatile qui permet le suivi efficace de digue monocouche en blocs béton préfabriqués grâce à une analyse objective et simplifiée de l'état d'un ouvrage dans le temps par tous les acteurs impliqués (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprise, assurances, experts judiciaires). Il en résulte un meilleur suivi et une économie substantielle car les inspections sont réalisées en quelques heures pour les petits ouvrages jusqu'à quelques jours pour de très grandes structures. Une fois les conclusions sur l'état de la carapace remises au maître d'ouvrage, celui-ci peut gérer le plan d'entretien de son ouvrage en toute connaissance de cause. Les maîtres d'ouvrage pourront faire réaliser les inspections sur des bases régulières ou après des événements significatifs. L'outil s'intègre ainsi logiquement dans les démarches de BIM (Building Information Modeling), de DOE (Dossier des Ouvrages Exécutés) numériques et de gestion patrimoniale qui s'imposent progressivement aux projets maritimes.

4. Références

- [1] CEREMA (2014). *Guide Enrochement - L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques - Traduction française du Rock Manual - 2nde édition*
- [2] CETMEF (2002). *Surveillance, auscultation et entretien des ouvrages maritimes. Fascicule 4 : Dignes à talus et digues mixtes*

Ref. Author : José-Luis Monsó – SENER – email: joseluis.monso@sener.es

Creu Casas i Sicart, 86-88 Parc de l'Alba 08290 Cerdanyola del Vallès – Barcelona - Spain

Co-authors :

Stafania Mirtolini – SENER – email: stafania.mirtolini@sener.es

Creu Casas i Sicart, 86-88 Parc de l'Alba 08290 Cerdanyola del Vallès – Barcelona – Spain

Oiane Niebla – SENER – email: oiane.niebla@sener.es

Avda. Zugazarte, 56 | 48930, Las Arenas (Vizcaya) - Spain

Key words : Ports Digitalization, Digital Twin, Integration of Intermodality Services, Synchronomodality, Smart Ports

The Way to Digitization and the Integration of Intermodal Services in Ports

Abstract in French

Notre société mondiale d'ingénierie SENER ouvre la voie à la numérisation, à l'efficacité énergétique et à la décarbonation des ports, ainsi qu'à l'amélioration de la gestion et de l'intégration des services liés à la logistique et à l'intermodalité.

Dans cet article, nous allons présenter deux exemples d'enjeux clés de la digitalisation des ports : un jumeau numérique d'un port et un système de gestion portuaire multimodale.

Un jumeau numérique a été développé par SENER à Port El Callao (Pérou) pour la numérisation de la gestion des actifs portuaires. Cela a entraîné de nombreux avantages dans la prise de décision, dans l'optimisation de l'exploitation et de la maintenance et dans la réduction des OPEX. Cela a également apporté une sécurité accrue, assurant également un fonctionnement durable et une réduction de l'impact environnemental. Ses fonctionnalités étaient la centralisation et l'accessibilité de l'information en temps réel, les tableaux de bord et l'aide à la décision et la réduction des coûts.

Un système de gestion multimodale appelé Airis II Synchro dans le port de Séville (Espagne) a également été développé par SENER et d'autres partenaires (Port de Séville, SIPORT, Université de Séville, Université de Malaga). Il s'agissait du suivi et de la gestion des trois modes de transport dans le port (train, camion, bateau) pour obtenir leur synchronisation dans le temps. Ce système intermodal juste à temps a été réalisé grâce au suivi en temps réel des navires, des camions et des chemins de fer dans les installations portuaires. Cela a permis une combinaison logistique conjointe plus efficace des opérations maritimes et terrestres, ainsi qu'une réduction des temps d'attente au port et des émissions de CO2. Une amélioration de la prévision des marées du niveau d'eau disponible pour maximiser le tirant d'eau des navires était également nécessaire pour ce système de gestion multimodal. Cette planification juste à temps des différents modes de transport a pris en compte la coordination entre les compagnies maritimes/destinataires, le rail et la route, ainsi que le suivi des itinéraires maritimes. Dans les chemins de fer, on a pris en compte la gestion du trafic ferroviaire et la visualisation des données des trains, et dans les camions, la gestion des rendez-vous, l'attribution des créneaux horaires, la

coordination des entrées et sorties, la surveillance du trafic en temps réel, la gestion des incidents et la les données d'exploitation ont été prises en compte.

Abstract in English

Our global engineering firm SENER is leading the way towards digitization, energy efficiency and decarbonization of ports, as well as improving the management and integration of services related to logistics and inter-modality.

In this paper, we are going to present two examples of key issues in digitization of ports: a digital twin of a port and a multimodal management port system.

A digital twin was developed by SENER in Port El Callao (Perú) for the digitization of Port Assets Management. It resulted in many advantages in Decision Making, in Optimization of Operation and Maintenance and in OPEX Reduction. It also gave an increased security, also providing a sustainable operation and reduction of environmental impact. Its functionalities were centralization and accessibility of information in real time, dashboards and decision support and cost savings.

A multimodal management system called Airis II Synchro in the Port of Seville (Spain) was also developed by SENER and other partners (Port of Seville, SIPORT, Univ. of Seville, Univ. of Malaga). It consisted in the monitoring and management of the three transport modes in the port (train, truck, ship) to obtain their synchronization in time. This just-in-time intermodal system was done by real-time tracking of ships, trucks, and rail at port facilities. This allowed a more efficient joint logistics combination of maritime and land operations, and a reduction of waiting times in port and CO2 emissions. An improvement in the tides prediction of the available water sea level to maximize the draft of ships was also necessary for this multimodal management system. This just-in-time planning of the different modes of transport considered the coordination between shipping companies/consignees, rail and road, and the monitoring of ship routes. In the railways, it considered the rail traffic management and the train data visualization, and in the trucks, the reservation management appointments, the slot assignments, the coordination of inputs and outputs, the traffic monitoring in real time, the management of incidents and the operations data were considered.

1. Introduction and aims

In this paper, two examples of digitization of ports and multimodal port systems for improving the integration of services related to asset management and logistic services, respectively, will be presented.

For the digitization of ports, an example of a digital twin developed by SENER for El Callao Port in Peru will be presented.

Likewise, for the multimodality of logistic services, the Airis II Synchro project, in which SENER has participated for the Port of Seville in Spain, will also be introduced.

2. Article

2.1 Digital Twin of El Callao Port in Peru

The scope of the digitization project developed by SENER consisted in developing a digital twin for the concessionaire APM Terminals Callao, representing it in a realistic and reliable way, while including the existing infrastructure assets located in the concession area of the North Multipurpose Terminal of the Port of Callao (“TNM”) in Peru.

A Digital Twin is a computer virtual representation that serves as the real-time digital counterpart of a physical object or process. Digital Twins garner data from multiple sources, stemming from the lifecycle stages of the object, generating key performance indicators (KPIs), optimizing performance and streamlining its management.



Figure 1 : APM Terminal at El Callao Port (Peru)

The scope of services provided by SENER for the configuration of the Digital Twin and the Functional Design of the General Cargo Scales, included the following activities and functionalities:

- Creation of a digital twin using BIM methodology with a LOD 500 level for the entirety of the TNM, oriented to maintenance and operation.
- Proof of concept integrating the digital twin with SCADA Ignition, focused on equipment related to the main electrical intake.
- Configuration and definition of specific properties associated to hierarchical assets under the operation and maintenance logic, suitable to be implemented in redesign or renewal projects planned for the Terminal.
- Generation of a control panel embedded on a web platform for the management and maintenance of the facilities under the domain of the digital twin.
- Use of the digital model for in-field data acquisition via mobile devices.

- Supporting the topographic survey and LIDAR subcontractor for the generation of the model in terms of field verification.
- Utilizing point cloud generation services to benefit modeling by means of BIM methodology.
- Capturing 360-degree photographs while realizing site visits, connecting it to the digital twin as so that it's depicted as a visual tool.
- Recording instructional videos for the digital twin categorizing these by intended roles and functions



Figure 2 : Graphic outputs of the digital twin

SENER developed this digital twin using the BIM methodology, a first in the sector, which to date did not have an application of these characteristics developed using this methodology. By employing BIM, the pioneering digital twin of APMT Callao not only guarantees maximum reliability in terms of functional, technical and operational uses, but it also makes it possible to gradually integrate the new technologies and management systems that are being implemented in the organization.

The digital twin developed by SENER has allowed APMTTC to manage infrastructure assets since 2020. It is a data-based solution with integration flows that are used to manage large data processes and computational power for larger virtual worlds. This tool makes it possible to check the status, maintenance, dimension and operations of its infrastructure assets, structured by functional processes, and to manage and adapt new innovations. The latter has proved crucial for the proper operation of the terminal, as this is a brownfield terminal whose operation is very complex.

The Digital Twin provides a structured database for the information and documentation generated during the project life cycle. Having this information is vital when validating objects, systems and designs. In addition, the information is portable and coded, meaning that any authorized individuals can access it even when they are not connected, through a virtual and autonomous, non-immersive experience, displayed on computers and mobile devices such as tablets and smartphones. The digital architecture is modular, flexible, synchronized, and easily expandable, and is able to adapt to the different functional needs of the Terminal. It allows users to isolate elements, such as road surfaces, and discover underground and hidden public services.

It also lowers the risk of the operation and can be used to size areas for different commercial purposes, thus facilitating future designs. It has also improved communications with suppliers and among workers

by providing them with tools to enable virtual presence, interactive virtual encounters, virtual presentations, and more.

The digital twin allows to integrate information that, until then, had been scattered which will be useful in the short term to redesign the terminal.

The digital twin was built by the aggregation of individual models, merging them in the process named model federation. These models were hierarchical structured by processes and systems and include the following:

- Buildings, foundations, gates, infrastructures
- Detailed bathymetry, topography and surroundings
- Fixed and mobile equipment, utilities, operation and signalling.

SENER developed a comprehensive dashboard that allows for the interaction of the BIM model with other BBDDs (data bases) on top of Autodesk Forge using a webpage as a frontend interphase. The coding is in JavaScript and Node.js for generating interaction and analysis of BIM models and data. The Key Performance Indicators are shown as multiple charts and customized ad hoc for the project.

SENER also developed a button that allows the stakeholders to automatically generate key performance indicators based on the metadata stored within the elements. This button is especially useful during the operation & maintenance phases, as it allows stakeholders to see the overall health of the infrastructure and search information while scrolling around the Digital Twin.

A second API was developed to tie together the 360-degree photographs taken during the site visits and the Digital Twin. These photographs proved to play a huge role when designing the 3D models underlying the Digital Twin, as well as verifying some crucial data. Moreover, the application allowed the users to navigate project drawings and be directed to the different paths taken during the site visit.

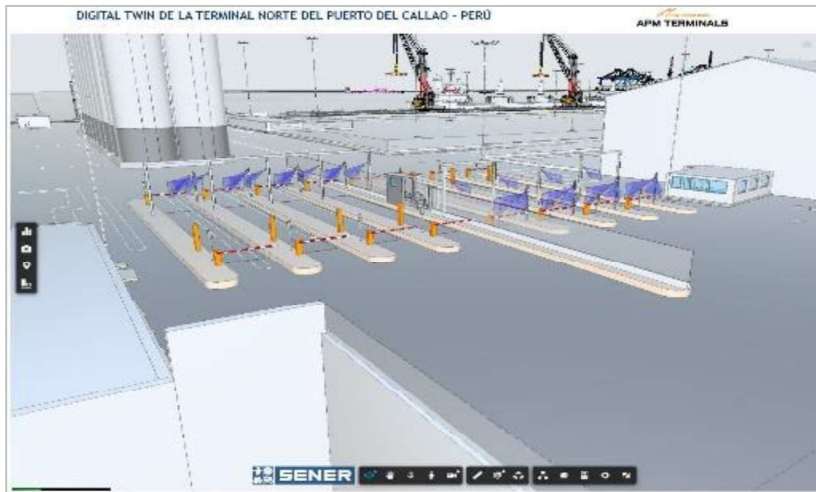


Figure 3 : Graphic 3D implementation of new gates in the digital twin

2.2 Intermodal management system Airis II Synchro developed for the Port of Seville

The AIRIS II SYNCHRO system, developed among others by SENER for the Seville Port Authority, optimizes land and sea transport management and favors synchronized intermodality between maritime transport (ship) and land transport (freight train and truck) in the Port of Seville. A wide variety of actors participate in the port operations of the Port of Seville, which are diverse, independent from each other and with interests that are not necessarily aligned. For example: Port Authority (APS), ADIF, railway companies, shipping agents, terminals, shipping companies, etc. In addition, if we add to this that the Port of Seville is an inland seaport, we must take into account that its operations are also strongly conditioned by the tide along the Guadalquivir River. With this project, the navigability along the river is improved and a land traffic management and planning tool is created that allows reducing logistics costs by reducing freight transport times and improving reliability in the logistics chain, as well as increasing safety and security, and reducing CO2 emissions into the atmosphere. For this, technological solutions are applied that, through the reception of information with external systems and with the ITS (Intelligent Traffic Systems) and RIS (River Information Services) equipment deployed in the field (ref.1), allow planning and monitoring of the different modes of transport and optimize transport logistics in the port area.

To this end, actions have been developed focused on two objectives: to improve navigability along the river and to improve intermodal operations.

2.2.1 Improving the navigability of the river estuary

Maritime traffic in the Guadalquivir River Estuary is mainly conditioned by the astronomical tide forced into the river from the Atlantic Ocean through its mouth. In the Gulf of Cádiz, where it is located, the ocean tide has an average amplitude of 1 meter and can reach 1.5 meters in spring tide conditions. The second process in order of relevance is identified with non-periodic oscillations of meteorological origin, generated mainly by atmospheric fluctuations of pressure and wind.



Figure 4 : Hydrodynamic Model of the Guadalquivir Estuary

Once the validity of the hydrodynamic model developed by the University of Malaga and Siport in predicting the astronomical tide was tested, the following studies focused on the description of the meteorological tide and the effect of freshwater discharges from the dam at the head of the estuary. The consideration of the joint effect of both phenomena, satisfactorily implemented, calibrated and validated through the numerical model, led to a notable improvement in the prediction tables of the depths of the still water level that conditions navigability at each point and instant of time in the estuary.

In inland ports, as is the case of the Port of Seville, where access is made by navigating through an estuary, river or artificial canal, the entry operation of the Eurovía (European Waterway) E.60.02 can be strongly conditioned by the tide or the level and river flow. In this type of ports, the development of timing and risk analysis tools makes it possible to identify the “operational windows” and maximize the draft of vessels in transit.

The estimation of the risk of stranding is obtained by applying the Monte Carlo method. A failure function (stranding) is defined in which the probability distributions of all the variables involved are considered, so that thousands of random navigation conditions can be simulated that allow the probability of failure to be estimated.

This tool obtains the probability of contact of the vessel with the bottom in each individual operation, so that it can be compared with previously established admissible probability values. The calculations involve the variables of climate, bathymetry, type and characteristics of the vessel, navigation speed, tidal wave and squat, which was simulated and also measured in situ.

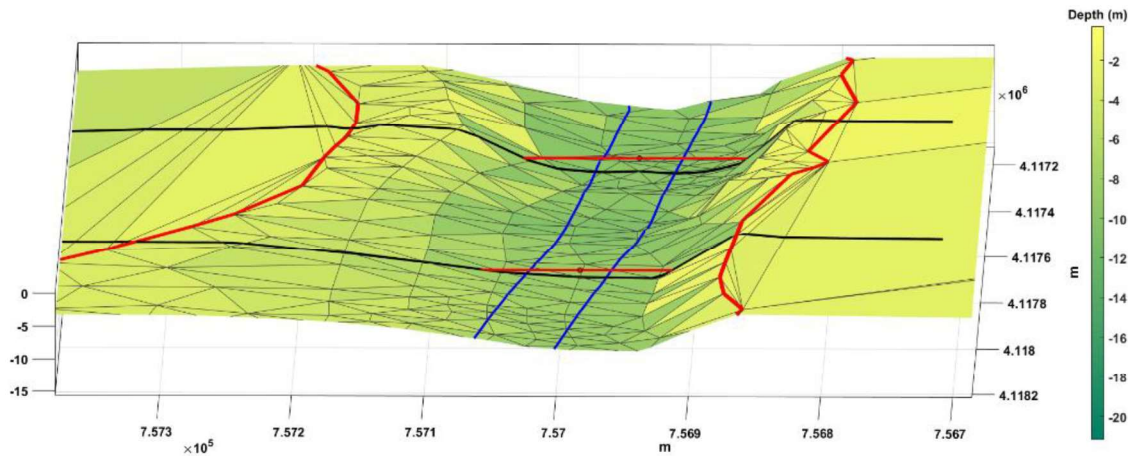


Figure 5 : Model output of the width and draft (UKC) available for navigation in the river

2.2.2 Improvement of rail, maritime and road intermodal operations

Also, within the framework of the AIRIS II – SYNCHRO project for the Port of Seville, a synchromodal railway planning and management web tool has been developed with triple functionality:

- Plan the route of the railway convoys, optimizing their intermodal operations. In addition to maintaining the lag times between consecutive trains, it is intended to facilitate compliance with the planned schedules for trains in nodes before and after the Port of Seville in the logistics networks.
- Monitor the key elements that affect circulation: TAF/TSI messages, when project is finished, state of level crossings (interrelation with the road mode) and presence of ships in the surroundings of the Port of Seville (interrelation with the navigation mode).
- Integrate the solution into the technological infrastructure of the Port of Seville through the Advanced Service Integration Platform (PAIS). From the PAIS, the necessary information is extracted about the state of the facilities, the railway convoys and the links with the administrator/user of the port facilities.

Likewise, within the framework of the same project, SENER has developed the AIRIS SYNCHRO-GAS tool for land traffic management and planning and synchromodal operation with triple functionality:

- Manage and supervise the port's transportation modes (road, sea and rail).
- Plan the road traffic to the port using an access management tool and entry requests by trucks.
- Integrate all the previous tools so that they are accessible from a single platform.

On the one hand, it is a web application that allows real-time visualization of the port's three modes of transport (road, sea and rail) based on the information shared by each of the modes. This allows the user to plan operations using the tool, in which arrival and departure estimated time data (ETA and ETD), freight, dock and other relevant information can be reflected for the programming of resources to improve operations of ports.

On the other hand, a prior appointment tool (GAS: Gate Appointment System) has been developed for trucks entering the port in such a way that they are synchronized as much as possible with the rest of the modes of transport.

It is based on an APP for trucks and a web tool for the rest of the users. In it, the port entry slots for trucks will be managed, depending on the needs at any given time. The carrier itself will reserve its entry time to the port based on the assigned slots. This makes it possible to synchronize the arrival of the ship and/or train with that of the truck. This results in savings in waiting times with the consequent reduction of emissions into the atmosphere.

3. Conclusions and perspectives

The main conclusions of this paper about the way to digitization and the integration of intermodal services in ports are the following:

- The digital twin developed by SENER in Port El Callao (Perú) for the digitization of the port assets management resulted in many advantages in decision making, in optimization of operation and maintenance and in OPEX reduction. It also allowed an operational reliability, since failures were reduced or eliminated, an increased capacity, through a better availability

and use of the Terminal, savings in life cycle costs, through the optimization of maintenance activities, and security, since the number and magnitude of incidents were reduced.

- On the other hand, the numerical modeling tools developed to improve the navigability and hydrodynamic behavior of the Guadalquivir River estuary made it possible to establish the maximum entry and exit drafts depending on the tide level, as well as the operational windows. They also provided information on critical sections, which is a very relevant indicator for the maintenance of the navigable waterway. Likewise, precise and updated knowledge of the bathymetry of the navigation channel made it possible to optimize the access and exit UKCs.
- Likewise, within the framework of the AIRIS II – SYNCHRO project for the Port of Seville, a port management and planning web tool has been developed. On the one hand, it is a web application that allows real-time visualization of the port's three modes of transport (road, sea and rail) based on the information shared by each of the modes. This allows the user to plan operations using said tool, in which arrival and departure data, freight, dock and other relevant information for the programming of resources to improve port operations can be seen.

The perspectives of the implementation of these digitization tools are promising in terms of optimizing cost and time savings in the port assets management and the efficiency of intermodal transport services. Finally, the next arrival of new AI tools will surely boost the improvements in these innovation techniques for smart port developments.

Bibliography references

- (1) Fastenbauer, M., Sattler, M., Schilk, G. (2007). “River Information Services for Commercial Users in the Inland Waterway Sector” in *2007 International Symposium on Logistics and Industrial Informatics*, Wildau, Germany, pp. 31-36.
<https://doi.org/10.1109/LINDI.2007.4343508>

Auteur principal : *Valentino Elena* – Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Centrale – e.valentino@adsptirrenocentrale.it – via Roma n.29, Salerno, SA – Italy.

Co-auteurs : *Tiziano Zarra* – Sanitary Environmental Engineering Division (SEED), Department of Civil Engineering, University of Salerno – Consorzio inter-Universitario per la Previsione e la Prevenzione dei Grandi Rischi (C.U.G.RI) – tzarra@unisa.it – via Giovanni Paolo II, Fisciano, SA – Italy; *Aniello Mariniello* – Sanitary Environmental Engineering Division (SEED), Department of Civil Engineering, University of Salerno – amariniello@unisa.it – via Giovanni Paolo II, Fisciano, SA – Italy ; *Giuseppina Oliva* – Sanitary Environmental Engineering Division (SEED), Department of Civil Engineering, University of Salerno – goliva@unisa.it – via Giovanni Paolo II, Fisciano, SA – Italy; *Vincenzo Marino* – Consorzio inter-Universitario per la Previsione e la Prevenzione dei Grandi Rischi (C.U.G.RI) – enzomario91@gmail.com – via Giovanni Paolo II, Fisciano, SA – Italy ; *Gianluigi Lalicata* – Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Centrale – g.lalicata@adsptirrenocentrale.it – via Roma n.29, Salerno, SA – Italy; *Fausto Caputo* – Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Centrale – f.caputo@adsptirrenocentrale.it – via Roma n.29, Salerno, SA – Italy; *Vincenzo Naddeo* – Sanitary Environmental Engineering Division (SEED) – Department of Civil Engineering, University of Salerno, Consorzio inter-Universitario per la Previsione e la Prevenzione dei Grandi Rischi (C.U.G.RI) – vnaddeo@unisa.it – via Giovanni Paolo II, Fisciano, SA – Italy; *Vincenzo Belgiorno* – Sanitary Environmental Engineering Division (SEED), Department of Civil Engineering, University of Salerno, Consorzio inter-Universitario per la Previsione e la Prevenzione dei Grandi Rischi (C.U.G.RI) – v.belgiorno@unisa.it – via Giovanni Paolo II, Fisciano, SA – Italy.

Mots clés/Key words : air quality, climate change, enviromental monitoring, ports developments.

Climate change minimization in port developments located in sensitive and complex areas

Résumé de l'article: Le changement climatique et les émissions de gaz à effet de serre sont actuellement l'un des problèmes les plus urgents auxquels notre planète est confrontée. On leur attribue des effets négatifs et désastreux au niveau mondial, tels que la fonte des glaciers, la désertification avec la découverte de la biodiversité et l'augmentation des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes. Les ports commerciaux jouent un rôle stratégique dans le développement économique et social d'une société. Cependant, diverses pressions environnementales sont également liées à ces activités stratégiques. Afin de garantir un développement durable, il est donc essentiel de combiner les besoins opérationnels et de développement avec le concept de durabilité environnementale, avec une référence particulière aux aspects du changement climatique et de la qualité de l'air. La recherche présente et discute le développement et l'application d'un plan de surveillance avancé dans le contexte de l'expansion et de l'amélioration d'une grande zone portuaire, dans le but de minimiser les effets négatifs potentiels sur le changement climatique. Les études expérimentales sont menées en référence au port situé dans la municipalité de Salerne, dans une zone complexe, proche du centre urbain. Les polluants atmosphériques traditionnels et émergents sont caractérisés et mesurés à l'aide de stations de mesure de la qualité de l'air mobiles et fixes, équipées d'instruments automatiques. Les activités de surveillance sur 4 ans sont présentées. La méthodologie proposée montre l'importance d'une surveillance continue de la qualité de l'air

lors de nouveaux développements ou d'expansions de ports, en particulier dans le cas de leur localisation dans des zones sensibles, afin de permettre une véritable durabilité environnementale. La recherche met en évidence une approche intégrée et durable dans la perspective de l'économie circulaire et de la transition écologique pour la minimisation du changement climatique dans les zones complexes.

Article's abstract : Climate change and greenhouse gas emissions are currently one of the most pressing issues facing our planet. Negative and disastrous effects on a global level are attributed to them, such as the melting of glaciers, desertification with the discovery of biodiversity and the increase in extreme weather and climate events. Commercial ports play a strategic role in the economic and social development of a society. However, various environmental pressures are also linked to these strategic activities. In order to ensure sustainable development, it is therefore essential to combine operational and development needs with the concept of environmental sustainability, with particular reference to the aspects of climate change and air quality. The research presents and discusses the development and application of an advanced monitoring plan in the context of the expansion and enhancement of a large port area, with the aim of minimizing the potential negative effects on climate change. The experimental studies are carried out with reference to the Port located in the Municipality of Salerno in a complex area, close to the urban centre. Traditional and emerging air pollutants are characterized and measured with mobile and fixed air quality stations, with automatic instrumentation. The 4-year monitoring activities are presented. The methodology proposed shows the importance of providing continuous monitoring of air quality during new developments or expansions of ports, especially in the case of their location in sensitive areas, to enable real environmental sustainability. The research highlights an integrated and sustainable approach in the perspective of circular economy and ecological transition for the minimization of climate change in complex areas.

Article :

1. Introduction and aims

Climate change, mainly due to the emissions and accumulation of greenhouse gases (GHG) in the atmosphere, are considered to be the cause of the increase in the global average temperature of the earth's surface (1). The World Meteorological Organization (WMO) has estimated that the temperature has risen by approximately +1.15°C compared to pre-industrial levels, resulting in adverse effects, such as intense climate events, glacier melting and sea level rise, with impressive impacts on ecosystems and societies. GHG including CO₂, CH₄, NO₂, and O₃ have both natural and anthropogenic origins, including fossil fuel use, deforestation, intensive agriculture, industrial processes, transportation and large civil engineering projects building and exercise (2). Ports, essential for trade and economic development (3), are complex infrastructures with diverse purposes, activities, geography, and applicable laws (4). Among their main recognized environmental pressures are included gaseous emissions to air (5), in

particular those relating to particulate matter (PM), nitrogen oxides (NO_x), sulphur dioxide (SO₂), carbon monoxide (CO) and volatile organic compounds (VOCs) (6). Moreover, also ports can contribute to greenhouse gas (GHG) emissions (7). According to the European Parliament, of the maritime sector's CO₂ emissions, between 6 and 7% are generated at berth in ports in the European Economic Area (8). Commercial maritime transport accounts for about 1 billion tons of CO₂ emissions annually and 2.7% of global CO₂ emissions (8). In Europe, over of 90% of SO₂ emissions and significant contributions to PM_{2.5}, PM₁₀, and NO_x emissions, equal to 45%, 28%, and 35% respectively, are attributed to the port activities (9). Prolonged exposure to atmospheric pollutants can lead to health issues like respiratory diseases, emphysema, bronchitis, asthma, and other symptoms (10). Consequently, controlling greenhouse gas and air pollutant emissions is crucial for protecting human health and environment. This concern has made environmental management an essential aspect of port activities as well (11). Direct and indirect approaches can be implemented in order to control these emissions. Direct approaches involve specific actions, like as the installation of filters or scrubbers to directly reduce or eliminate emissions of GHG and pollutants into the atmosphere. Indirect approaches focus on broader strategies and policies that address the sources of these emissions, through the design and implementation of monitoring systems to characterize, measure and monitor emissions in order to control them. Furthermore, the monitoring systems provides real-time data on air quality to governments, researchers, and the public, useful to make evidence-based decisions and drive transformation towards cleaner air (12). Their application is therefore strongly suggested and has been growing in recent years. At present, however, there are no standardized procedures, unique and unanimously shared guidelines that support the proposer in the design and development of monitoring plans and systems. Furthermore, the real-scale application of air quality monitoring in complex sites such as port areas is scarce and often does not provide detailed information and evidence of the results. These elements can produce ineffective systems, waste economic and human resources, and fail to achieve the result of protecting people and the environment. A challenge of modern society is therefore aimed at defining procedures and support tools for the development and implementation of effective air monitoring systems. This research fits into the themes described with the aim of contributing to the lack of existing information. The study focuses on the development, and application of an advanced monitoring plan in the context of the expansion and enhancement of a large port area, with the aim of minimizing the potential negative effects on air quality and climate change. The plan aims to monitor the main parameters for the control of air quality in order to assess the pressures and intervene in case of potential negative values. The design of the monitoring plan includes the identification of the monitoring points, of the indicators (such as PM₁₀, NO_x, SO₂, O₃), the sampling frequency and duration. Compliance with air quality standards established by regulations is evaluated, and corrective actions are planned if critical non-compliance aspects occur for improving air quality. The case study of Salerno port area is described. The results of monitoring in the various stages of project implementation are reported and discussed.

2. The Port of Salerno expansion and enhancement

The commercial port of Salerno, located in the historic Porto district, has a long history dating back to Roman times. Over time, it has undergone expansions and renovations, and it comprises four piers: Molo Manfredi to the east, Molo Levante to the south, Molo Trapezio to the north, and Molo Ponente to the southwest. The port handles both passenger and cargo traffic. In recent years, there has been a

notable increase in passenger traffic, particularly attributed to the construction of the new maritime station, as well as significant growth in cargo traffic, prompting investments in port technology and capacity. However, physical constraints such as the shallow port seabed and the narrow entrance have hindered further expansions. In response to changing global trends in the maritime sector, especially the proliferation of increasingly larger container ships, planning and programming of design interventions have aimed to enhance the port's position and competitiveness in the international market. The expansion and enhancement of ports are essential to address the challenges of the current global scenario characterized by economic growth and maritime transportation demand. These interventions go beyond the creation of new infrastructure, encompassing technical, environmental, economic, and social aspects. New port infrastructure must be developed sustainably, considering the protection of the marine environment, the reduction of pollutant emissions, and the promotion of innovation in resource management. Striking a balance between economic and environmental needs is crucial for a sustainable future. The expansion can support cargo diversification, reducing reliance on specific sectors and increasing resilience. Furthermore, expansion benefits the local economy through new job opportunities, investments, and increased business activity. Anticipated benefits include more efficient management of traffic, facilitation of international trade, and reduced waiting times for ships. Enhanced competitiveness attracts prestigious ships and shipping lines, reinforcing the position in the global supply chain. In summary, port expansion aims to improve capacity, efficiency, and competitiveness, with benefits extending to the local economy, international trade, and overall infrastructure development. Considering these needs, the latest and most recent port enhancement project, object of the monitoring activities, has therefore identified three main interventions (A: enlargement of the harbour mouth; B: extension of the Trapezio pier; C: deepening of port seabed), schematized in Figure 1 and described in the following paragraph.

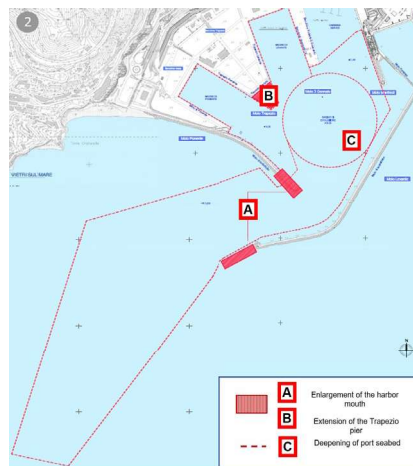


Figure 1 – Main upgrading and enhancement interventions

2.1. The upgrading interventions

The enlargement of the harbour mouth is aimed at allowing longer ships to enter the port basin and involves the resection of the sub-billow pier for about 100 meters, apt to bring the size of the mouth to

about 310 meters, again with reference to the part with greater depth. The intervention requires greater protection of the dock from the foreseeable increase in the wave motion within it, for the satisfaction of which the extension of the breakwater pier for about 200 meters. In addition, in order to ensure at least one operational berth on each side, adequate to the size of the ships, it was planned to extend the pier beyond the head bank (Trapezio pier). The intervention of deepening the seabed is aimed at satisfying the fundamental and indispensable objective of allowing the entry into the port basin of vessels of draft equal to or greater than 14 meters. To this end, the intervention modified the bathymetries with a total volume dredged was about 2.9 million m³ plus over dredging.

3. Environmental advanced air monitoring and control plan

3.1. The monitoring plan

The location of the sampling and monitoring stations have been selected based on the results of a specific environmental impact assessment study. This choice took into account the characteristics of the geographical and environmental context to collect data on air quality and meteorological conditions near the port. Figure 2 provides details on the identification and positioning of the monitoring stations. Six stations have been identified (ATMi, $i=01-06$), with three fixed within the port area (ATM01-ATM03) and the other three located in the surrounding zones, close to the main sensitive targets (ATM04-ATM06).

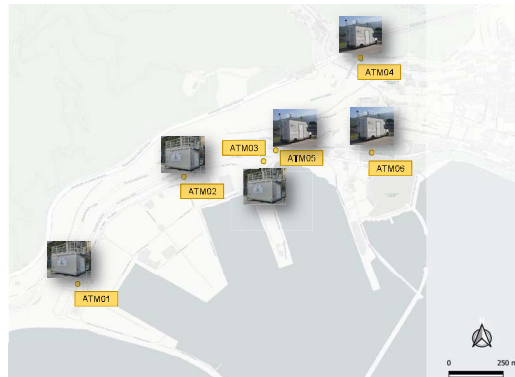


Figure 2 - Identification of the monitoring stations (ATMi, $i=01-06$)

While Table 1 highlights the monitored parameters at each sampling stations, identified according to their representativeness of potential emission sources, along with their corresponding reference values established by regulations (ref). Furthermore, the monitoring plan also included the installation of a complete weather station in ATM02, with the monitoring of the main meteorological parameters, for the purpose of evaluating the dispersive effects.

Table 1 – Monitoring parameters and normative values (Italian Legislative Decree 155/2010)

Parameter	Acquisition period	Mediation period	Concentration threshold (D.Lgs 155/2010)
PM ₁₀	24 hours	24 hours	50 µg/m ³
	24 hours	year	40 µg/m ³
CO	Average hourly value	max of 8-hours moving average per day	10 mg/m ³
NO ₂	1 hour	1 hour	200 µg/m ³
		1 hour (measured over 3 consecutive hours)	400 µg/m ³
		year	40 µg/m ³
NO _x	1 hour	year	30 µg/m ³
Benzene (C ₆ H ₆)	24 hours	year	5 µg/m ³
SO ₂	1 hour	1 hour	350 µg/m ³
		1 hour (measured over 3 consecutive hours)	500 µg/m ³
		Daily average	125 µg/m ³
Ozone (O ₃)	1 hour	1 hour	180 µg/m ³
		8-hour moving average	120 µg/m ³
Arsenic	24 hours		6,0 ng/m ³
Cadmium	24 hours	year	5,0 ng/m ³
Nickel	24 hours		20,0 ng/m ³
Benzo(a)pyrene	24 hours	year	1,0 ng/m ³

In accordance with the Environmental Impact Assessment (EIA) procedure to which the works were subject and to guarantee the oversight of every potential interference, the monitoring plan was developed and implemented for the three project stages (“*ante-operam*” (AO); “*in corso d’operam*” (CO) and “*post-operam*” (PO)) with the different monitoring frequencies and number of campaigns (Table 2).

Table 2 – monitoring frequencies and number of campaigns for the different project stages

Phase/Stage	Phase duration	Campaign		Total number of campaigns
		Frequency	Duration	
<i>ante-operam</i> (AO)	4 months	every 2 months	30 days for gaseous pollutants	2
<i>in corso d’operam</i> (CO)	18 months	every six-month	and 5 days for metals and IPA	4
<i>post-operam</i> (PO)	24 months	every six-month		4

4. Results and discussions

The data monitored by the weather station indicates that the average wind speeds during the three different project stages range from 1-1.8 m s⁻¹. The average daily temperatures resulted of 19.5°C, while the relative humidity values average at 59.6%, with a peak of 64.4% during the AO phase. The results obtained from the analysis of non-conventional pollutants, such as metals (particularly arsenic, cadmium, and nickel) and PAHs (particularly benzo(a)pyrene), during the three different project stages indicate that all values are below their detection limits and consequently well below their regulatory limit value. Figure 3 shows the hourly averages of the measured concentrations throughout the monitoring period for the analytes at all stations in the three project phases: AO, IO and PO.

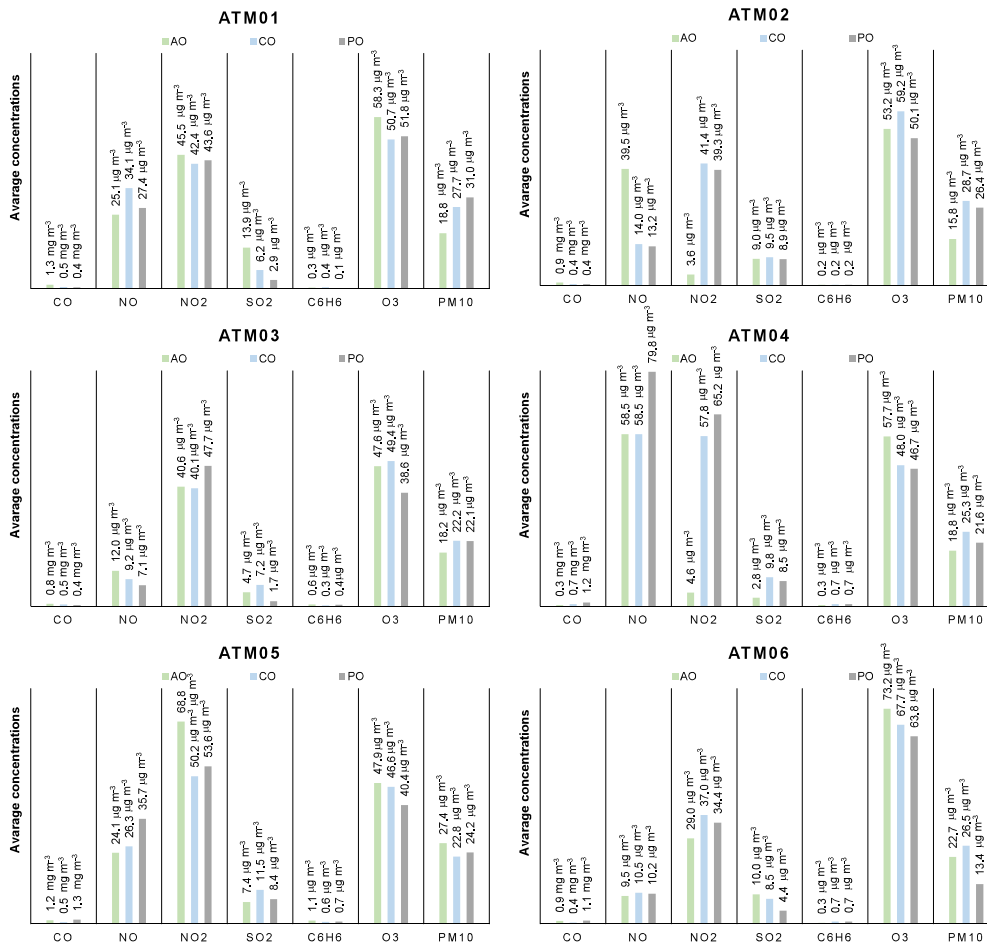


Figure 3 - Comparison of priority pollutants in the three project phases for each monitoring station

Analysis of the results shows variability in analyte levels between different phases and stations. At station ATM01, lower average values are observed for pollutants such as CO, SO₂ and C₆H₆ during the PO phase compared to the other phases, while for the PM₁₀ parameter slightly higher values are recorded during the PO phase. The considerations change if different stations are considered. For example, for ATM04, where the values of CO, SO₂ and C₆H₆ are lower during the AO phase, while the values of PM₁₀ during the PO phase decrease. However, all the results recorded are well below the regulatory reference values in the three project phases, thus demonstrating the environmental sustainability of the works carried out and their negligible interference on air quality.

5. Conclusions

The research addresses the issue of minimizing climate change and atmospheric pollution through an advanced environmental monitoring plan. The rigorous implementation of the monitoring plan emerges as a crucial strategy to tackle this challenge. The measurement of greenhouse gas emissions, pollutants and the adoption of dispersive models provides essential data to understand environmental issues and

evaluate the effectiveness of mitigation policies. Continuous monitoring lays the foundation for informed decisions and strategic adjustments over time, maximizing the efficacy of actions. Involving governments, industries, non-governmental organizations, and civil society is essential for the success of the plan, with international collaboration and data sharing as key elements. Through the characterization, measurement, evaluation and continuous sharing of data it is then possible to identify immediate and effective actions to tackle this challenge, by translating data into concrete policies and actions, including transitioning to renewable energy, promoting energy efficiency, and adopting sustainable practices. A tailored monitoring plan is the first fundamental element to address climate change and pollution, combining accurate data, targeted policies, and collective actions for a more sustainable future.

Bibliography

- (1) Azarkamand, S., Wooldridge, C., & Darbra, R. M. (2020). Review of Initiatives and Methodologies to Reduce CO₂ Emissions and Climate Change Effects in Ports. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113858>.
- (2) Pahunang, R. R., Buonerba, A., Senatore, V., Oliva, G., Ouda, M., Zarra, T., Muñoz, R., Puig, S., Ballesteros, F. C., Li, C-W., Hasan, S. W., Belgiorno, V., Naddeo, V. (2021). Advances in technological control of greenhouse gas emissions from wastewater in the context of circular economy, *STOTEN*, V. 792, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148479>.
- (3) Emissions of air pollutants from transport—European Environment Agency. (n.d.). [Indicator Assessment]. Retrieved 31 August 2023, from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-air-pollutants-8/transport-emissions-of-air-pollutants-8>.
- (4) Merico, E., Cesari, D., Gregoris, E., Gambaro, A., Cordella, M., & Contini, D. (2021). Shipping and Air Quality in Italian Port Cities: State-of-the-Art Analysis of Available Results of Estimated Impacts. *Atmosphere*, 12(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/atmos12050536>.
- (5) Mersin, K., Bayırhan, İ., & Gazioğlu, C. (2019). Review of CO₂ Emission and Reducing Methods in Maritime Transportation. <http://acikerisim.gelisim.edu.tr/xmlui/handle/11363/2009>.
- (6) Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., Begum, R. A., Betts, R., Kerr, R. B., Biesbroek, R., Birkmann, J., Bowen, K., Castellanos, E., Cissé, G., Constable, A., Cramer, W., Dodman, D., Eriksen, S. H., Fischlin, A., Ibrahim, Z. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. IPCC. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/594799>.
- (7) Wright, P. (2013). Impacts of climate change on ports and shipping [Pdf]. MCCIP Science Review 2013, 8 pages. <https://doi.org/10.14465/2013.ARC28.263-270>.
- (8) Alamoush, A. S., Ballini, F., Ölçer, A.I. (2020). Ports' technical and operational measures to reduce greenhouse gas emission and improve energy efficiency: A review, *Marine Pollution Bulletin*, v. 160, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111508>.
- (9) World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329>.
- (10) Prado-Bert, P. de, Warembourg, C., Dedele, A., Heude, B., Borràs, E., Sabidó, E., Aasvang, G. M., Lepeule, J., Wright, J., Urquiza, J., Gützkow, K. B., Maitre, L., Chatzi, L., Casas, M., Vafeiadi, M., Nieuwenhuijsen, M. J., Castro, M. de, Grazuleviciene, R., McEachan, R. R. C., ...Bustamante, M. (2022). Short- and medium-term air pollution exposure, plasmatic protein levels and blood pressure in children. *Environmental Research*, 211, 113109. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113109>.
- (11) Puig, M., Wooldridge, C., Michail, A., & Darbra, R. M. (2015). Current status and trends of the environmental performance in European ports. *Environmental Science & Policy*, 48, 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2014.12.004>.
- (12) Gulia, S., Nagendra, S.M.S., Khare, M., Khanna I. (2015). Urban air quality management-A review, *Atmospheric Pollution Research*, Volume 6, Issue 2, ISSN 1309-1042, <https://doi.org/10.5094/APR.2015.033>.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)

Auteur principal : Jorge Martín Jiménez – Balearic Port Authority – jmartin@portsdebalears.com - Moll Vell, 3-5. Palma.Spain

Co-auteurs : Rafael Grau Grau – BPA – rafaelgrau@portsdebalears.com

Mots clés/Key words : Cold Ironing, electricity grid, decarbonization, emissions, climate change, reduction

« Cold ironing » facilities in the general interest ports of the Balearic Islands.

The Balearic Islands Port Authority (BPA), aware of the environmental impact caused by port activity in its surroundings, began in 2016 studies for the implementation of measures for its mitigation and to apply solutions that improve air quality in its ports.

When at berth, the ferries use their auxiliary engines to produce electricity at loading, unloading and parking operations, with the consequent emission of polluting gases as well as noise and vibrations.

The *Onshore Power Supply* (also called *Cold Ironing*) basically consists of connecting ships to the land electricity grid in their port call, so that the auxiliary engines that maintain their main basic systems can be turned off during their stay, avoiding sources of noise and contamination near population.

The Port of Palma has been the first in Spain to develop an electrification project to supply medium voltage electricity to the docked ferries, executed at Paraires Quay.

BPA is now going to replicate these projects in other ports under its management, with the aim of complying with Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of October 22, 2014, which requires that Seaports provide for the availability of clean alternative fuels, contributing to decarbonization and improving the environmental performance of the transport sector, with the investment of 100 million euros, defined in its Business Plan, with European Union financing.

The system will allow the reduction of sulphur dioxide (SO₂), nitrous oxides (NO_x), particulate matter (PM_x), volatile organic compounds (VOC), carbon dioxide (CO₂) and substances that deplete the ozone layer emissions.

In each port there will be:

For Medium Voltage connection, aimed at 'ferry' type vessels, a supply point with a maximum power demand of 1,600kW (2,000kVA), at a nominal voltage of 11kV, equipped with a connection box with 2x350A triphasic connectors.

For Low Voltage connection, for 'fast ferry' type vessels, a supply point with a maximum power demand of 800kW (1,000kVA) is planned, at a nominal voltage of 400V, equipped with a connection box with 5x350A triphasic connectors.

Projects in this phase, planned to be expanded, correspond to Alcúdia, Eivissa, Maó and Palma ports.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

-

**25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)**

1. Introduction.

On 12 May 2006, the Commission Recommendation of 8 May 2006 on the promotion of the use of shore-side electricity by ships at berth in Community ports was published in the Official Journal of the European Union.

The text contained the following recommendations:

- 1) Member States should consider the installation of shore-side electricity for use by ships at berth in ports, particularly in ports where air quality limit values are exceeded or where there is public concern about high levels of noise nuisance, and especially in berths located close to residential areas.
- 2) Member States should take note of the information, set out in the Annex, on the cost-effectiveness and feasibility of using shore-side electricity to reduce emissions on various types of ships, routes and ports. However, environmental benefits and cost-effectiveness should be assessed on a case-by-case basis.
- 3) Member States should work within the International Maritime Organisation (IMO) on the ongoing revision of the International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL Convention) to promote the development of harmonised international standards on shore-side electricity connections, taking into account work already underway.
- 4) Member States should consider providing economic incentives to ship operators to use shore-side electricity offered to ships, taking advantage of the possibilities offered by Community legislation.
- 5) Member States should promote awareness of shore-side electricity among local authorities responsible for port areas, maritime authorities, port authorities, classification societies and industry associations.
- 6) Member States should encourage port authorities and industry to exchange best practices related to shore-side electricity supply and harmonisation procedures for the provision of shore-side electricity.
- 7) Member States should report to the Commission on the measures they intend to take to reduce emissions from ships in ports, particularly where air quality limit values are exceeded.

Moreover, in the report Air quality is the second environmental priority for ports in 2022, moving down one spot in favour of climate change. Air quality was the top priority for ports between 2013 - 2021. Emissions in the air in ports are generated mainly by vessels, but also by port operations, industrial activities and other related traffic, and include emissions of SO_x, NO_x and particulate matter. These emissions have negative effects, creating poor air quality



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)

that affects the environment as well as port stakeholders and local communities. Since ports are locations where a lot of transport modes and industrial activities come together, air quality has become a key determinant of public "acceptance" of port activity. It therefore remains a key concern for European ports.



Figure 1. ESPO Environmental Report 2022 EcoPortsInSights 2022

The Port Authority, which manages the ports of Palma, Alcudia, Ibiza, Mahón and La Savina, which are ports that are indissolubly integrated with the city due to their proximity and which are also located in a setting of high natural value and which in most cases are environmentally protected, should promote projects that comply with the Commission's recommendation and which are coherent with the Authority's commitment to the environment.

2. Preliminary project

In 2011, the Port Authority decided to tackle a first preliminary project for what would be the first medium voltage electrical connection to ships in Spain, and to do so we had to be aware of the difficulties involved:



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

-

**25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)**

- Significant investment for a project that was innovative for our country at the time and therefore entailed a risk of not being used.
- Lack of a clear commitment from potential users of the OPS system, probably due to the investment they had to make for the transformation of their ships and their lack of interest in depending on the Port Authority for the energy supply.
- Lack of availability of the power required from the supplier with high power term costs.

Despite the difficulties, the preliminary project was carried out, choosing the dock in the port of Palma closest to the city, which was the Peraïres dock, and throughout the process, meetings were held with the shipping companies that were potential users of the installation, from which intermittent support was received, which served to support the development of a construction project that could be put out to tender. The Port Authority's vision for OPS solutions meant that in two of the most important works being carried out at that time (Explanadas y Muelles Comerciales in the port of Ibiza and the Expansion of the western quays of the port of Palma), the installation of a future OPS project was planned.

3. Construction project

The construction project served to deploy in the port of Palma de Mallorca the first green dock with a connection point for the electrical supply of ferries, which will be able to supply a maximum power of 2,000 kVA at a frequency of 50-60 Hz suitable for the connection of ferries.

The main elements of the project are as follows:

- 2,000 kVA substation, equipped with a 2MVA frequency converter.
- 11 kV power supply line from the substation to the tap-off point on the quay side of the quay.
- Quay-side switchboard, with 2 three-phase connectors (integrating the earth connections), 3 pilot cables and fibre optics for communications). One connector will be used for the other will be a back-up connector.

The connection point for the electrical supply to ships will be connected to the 2,000 kVA substation, whose proposed location in the port is shown in Plan n° 2 -Area of Action and Plan Distribution-. This substation, of a containerised type to allow it to be moved to another location in the port if necessary, will be equipped with two transformers of 2,000 kVA each.

The power supply to the ships will be at a voltage of 11 kV at 50 or 60 Hz as required, so, as the voltage available in the port is 15 kV at 50 Hz, the substation as a whole will have a transformation ratio of 15/11 kV. The substation will also be equipped with frequency converters to convert the 50 Hz frequency of the port's electrical network to a frequency of 50-60 Hz, as required, for the electrical network supplying ships. The frequency conversion shall be carried out at low voltage at 690 V.

The frequency conversion system shall have a 15/0,69 kV 50 Hz step-down transformer at its input to adapt the voltage level for frequency conversion. At the output of the frequency conversion system there shall be a transformer to adapt the voltage level to the mains supply to ships with the



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

-

**25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)**

transformation ratio 0,69/11 kV and a frequency of 50-60 Hz, as required. The transformers to be installed will maintain galvanic separation between the connected ship and the existing electrical network in the port, on the one hand, and the electrical network supplying ships, on the other.

From this substation there will be two supply lines to the switchboard on the quay, equipped with two 350 A three-phase connectors (in accordance with the IEC/ISO/IEEE 80005-1 standard), and with the capacity to supply a ship. This switchboard shall be mechanically protected against damage by ship stays.

Adequate switchgear shall be provided for all switching and protection of the system. In order to improve the safety and operability of the manoeuvres carried out, the electrical system for supplying ships will have an automated control and monitoring system that allows external connection for centralised management of the port. The earthing system of the ship supply network must be independent, so a specific earthing network will be installed for this purpose. The distribution network feeding the ship connection point shall have an IT type neutral connection system without distributed neutral.

4. Institutional support

During this time, two letters of support were received from two city councils (Valencia and Ibiza) conveying the need to address projects in our ports that would eliminate polluting emissions, but without a doubt the definitive support for the project came from the public body Puertos del Estado, which proposed a proposal to a call for CEF funds that included various OPS projects in several Spanish ports (Spanish Port Master Plan), including the Peraires dock project. This support, together with the 50% rebate approved in the law accompanying the 2019 budgets on the tax for ships using an OPS system during their berthing. This support was undoubtedly definitive for tendering this project, which had a high budget (around €2m together with the cable management equipment).

5. Service provision

According to Regulation (EU) 2017/352 of the European Parliament and of the Council of 15 February 2017 establishing a framework for the provision of port services and adopting common rules on financial transparency in ports, the port bunkering service is understood as the "provision of bunkers, solid, liquid or gaseous fuel or any other source of energy used for the propulsion of the ship and for the general and specific supply of energy on board the ship while at berth", which would include the service of supplying electricity to ships at berth in port, known by its acronym OPS (Onshore Power Supply) or "Cold Ironing".

The operations included in the service are:

- Operation of the OPS installation: This activity involves the management of the monitoring and control systems of the OPS installation in order to synchronise and transfer the electrical



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

-

**25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)**

energy from the grid to the vessel, transforming the voltage and frequency of the grid to those required by the vessel to which it is supplied.

- Connection and disconnection of vessels: This activity involves the handling of the Cable Management System to deploy the power cabling until it is made available to the vessel's crew for connection to the corresponding dock socket, as well as the subsequent disconnection and retraction of the cabling.

In order to guarantee the principle of free competition and to eliminate restrictions that would result in a limited or even insufficient number of service providers, the service covered by this provisional licence does not include the following:

- The acquisition of electricity for the provision of the service through this connection. Said acquisition will correspond to the Port Authority for its sale to the vessel as a commercial service by virtue of the provisions of the twenty-first additional provision of Law 24/2013, of 26 December, on the electricity sector, in the wording given by article 21.6 of Royal Decree Law 15/2018.
- The sale of electrical energy to the vessels supplied. The service provider will limit itself to transferring energy to the vessels at berth, in accordance with the conditions established in the licence. The sale of energy will be made by the APB directly to the vessel, in accordance with the tariffs in force at any given time for the provision of commercial services. In order to take into account the objectives and particularities of this new installation, a proposal to update these tariffs is submitted to the APB Board of Directors, together with the provisional licence model.
- Maintenance of the OPS substation and the cable management system. These operations will be carried out by specialised, accredited companies contracted by APB. The role of the energy supply service provider will be limited in this case to coordinating with the maintainer to resolve incidents and faults, and it must ensure that any faults have been duly resolved in order to guarantee the provision of the service.

6. Projects in the development phase.

The new projects to be developed, which are currently in the project phase, are as follows:

- Electrical infrastructure in the Port of Alcudia for the electrical connection of ships to land in the first alignment of the Poniente docks. P.O.1112-G.
- Electrical infrastructure for the connection of ships to land at the Cós Nou docks in the Port of Maó. P.O.1113-G.
- Electrical installation for supplying ferries in the first outer section of the Commercial Docks of the Port of Palma. P.O.1357.
- Electrical infrastructure at the Botafoc Docks for the electrical connection of ships to land in the port of Eivissa. P.O. 1114-G.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

-

**25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)**

The projects and their execution will be financed with the subsidy from the programme of Support for Sustainable and Digital Transport in competitive competition, approved by Ministerial Order of 13 December 2022, which resolves the procedure for awarding the first call for subsidies from the Programme of Support for Sustainable and Digital Transport in competitive competition, in the framework of the Recovery, Transformation and Resilience Plan - financed by the European Union - NextGenerationEU), according to the bases of Order TMA/370/2022 of 21 April, published in the Official State Gazette number 102, of 29 April 2022, modified by Order TMA/513/2022, of 30 May, and by Order TMA/758/2022, of 27 July. Within the framework of the Recovery, Transformation and Resilience Plan - financed by the European Union - NextGenerationEU.

The action is defined by the application PATSYD-22-00061 for the APB: Coordination, communication and management, OPS for ferries in the port of Palma, OPS for ferries in the port of Eivissa, OPS for ferries in the port of Alcúdia, OPS for ferries in the port of Maó. For which a subsidy of 4,923,875.47 € has been granted.

Within the aforementioned programme, this action is part of COMPONENT 6: Sustainable, safe and connected mobility.

The objectives of the action are:

- Modernise, digitise and upgrade key transport infrastructures.
- To complete the European rail corridors as the backbone of mobility.
- Rebalance the modal split towards more sustainable modes.
- Improve intermodality and logistics.
- Promote the modernisation, digitisation and sustainability of transport and its companies.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)



References :

- COMMISSION RECOMMENDATION of 8 May 2006 on the promotion of the use of shore-side electricity by ships at berth in Community ports (Text with EEA relevance) (2006/339/EC).
- [ESPO Environmental Report 2022 EcoPortsinSights 2022](#)
- REGULATION (EU) 2017/352 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 15 February 2017 establishing a framework for the provision of port services and common rules on the financial transparency of ports



Auteur principal : Marco Pellegrini – marco.pellegrini3@unibo.it - Department of Industrial Engineering, University of Bologna – Viale del Risorgimento 2, Bologna - Italy
Co-auteurs : Cesare Saccani – cesare.saccani@unibo.it - Department of Industrial Engineering, University of Bologna – Viale del Risorgimento 2, Bologna – Italy
Alessandro Guzzini – alessandro.guzzini2@unibo.it - Department of Industrial Engineering, University of Bologna – Viale del Risorgimento 2, Bologna - Italy

Mots clés/Keywords : Sediment management, Circular economy, Environmental impact

The innovative ejectors' plant technology for sediment management in harbours

Résumé de l'article: Plus de 90 % du commerce mondial s'effectue par transport fluvial, qui constitue le moyen de transport de marchandises le plus important. Par conséquent, le commerce mondial dépend de manière cruciale de ports et d'un statut de navigation (navigabilité) adéquats. Préserver une bonne navigabilité est un défi car l'accès aux ports et aux voies navigables est souvent entravé, la grande majorité des 10,000 ports et havres dans le monde souffrant de sédimentation. Traditionnellement, les sédiments à l'origine du problème sont excavés, enlevés et déplacés par dragage d'entretien. Néanmoins, le dragage n'est pas efficace pour maintenir la navigabilité dans le temps. Cet objectif pourrait être atteint grâce à une fréquence plus élevée des opérations de dragage, mais cela entraînerait des coûts plus élevés et des procédures d'autorisation et de permis complexes. Le dragage d'entretien a également des impacts environnementaux considérables puisque les opérations de dragage peuvent : i) détruire ou modifier significativement les habitats sous-marins et la flore et la faune qui y résident, ii) remettre en suspension les sédiments et les contaminants déjà présents dans le fond marin, augmentant ainsi la concentration de solides en suspension dans la colonne d'eau avec des effets néfastes. effets sur l'écosystème, iii) impact local sur les émissions de gaz à effet de serre, de polluants et de bruit, iv) générer un déchet à éliminer, à savoir les déblais de dragage.

L'Université de Bologne a développé la technologie des « usines à éjecteurs » comme alternative durable au dragage d'entretien. Il a été récemment testé dans deux applications de démonstration dans la Marina de Cervia et la Marina de Cattolica (Italie). L'éjecteur est une pompe à jet ouverte (c'est-à-dire sans chambre d'aspiration fermée ni gorge de mélange) avec une section convergente au lieu d'un diffuseur et une série de buses positionnées autour de l'éjecteur. Chaque éjecteur est placé sur le lit d'eau et transfère l'élan d'un jet d'eau primaire à grande vitesse à un flux secondaire, un mélange d'eau et de sédiments environnants. Le mélange sédiment-eau est ensuite transporté par un pipeline et déversé dans une zone où les sédiments peuvent être captés par le courant d'eau naturel ou ne constituent pas un obstacle à la navigation.

Le document vise à montrer les résultats produits par les deux activités de surveillance des installations de démonstration, suggérant que la technologie est efficace et efficiente et que le fonctionnement de l'usine de démonstration s'accompagne d'une amélioration de plusieurs paramètres liés à l'état écologique de l'écosystème marin dans la zone affectée. par les éjecteurs dans un délai d'un an.

Article's abstract: More than 90% of global trade is carried by waterborne transport, constituting the most important means of transportation of goods. Therefore, global business critically depends on adequate ports, harbours, and navigation status (navigability). Preserving good navigability is challenging since port and harbour access and waterways are often hampered, as the vast majority of 10,000 ports and harbours worldwide suffer from sedimentation. Traditionally, the sediment that causes the problem is excavated, removed and relocated through maintenance dredging. Nevertheless, dredging is not effective in maintaining navigability over time. This objective may be reached through a higher frequency of dredging operations but would result in higher costs and complex authorization and permit procedures. Maintenance dredging also has considerable environmental impacts since dredging operations can: i) destroy or significantly modify underwater habitats and resident flora and fauna, ii) resuspend sediments and contaminants already present in the seabed, thus increasing the Suspended Solid Concentration in the water column with adverse effects for the ecosystem, iii) impact locally on greenhouse gas, pollutants and noise emissions, iv) generate a waste to be disposed, i.e. the dredged material.

The University of Bologna has developed the “ejectors plant” technology as a sustainable alternative to maintenance dredging. It has been recently tested in two demo applications in the Marina of Cervia and Marina of Cattolica (Italy). The ejector is an open jet pump (i.e. without a closed suction chamber and mixing throat) with a converging section instead of a diffuser and a series of nozzles positioned around the ejector. Each ejector is placed on the waterbed and transfers momentum from a high-speed primary water jet flow to a secondary flow, a mixture of water and the surrounding sediment. The sediment-water mixture is then conveyed through a pipeline and discharged in an area where the sediment can be picked up from the natural water current or is not an obstacle for navigation.

The paper aims to show the results produced by the two demo installation monitoring activities, suggesting that the technology is effective and efficient and that demo plant operation is accompanied by an improvement in several parameters related to the ecological status of the marine ecosystem in the area affected by ejectors within one year.

Article :

1. Introduction and aims

The need to remove deposited material from water basins is a common feature shared by harbours, ports and waterways. The most widely used solution to remove sediment deposits is dredging. Dredging is a well-known and reliable technology. Nevertheless, in specific conditions (i.e. smaller marinas and channels), dredging in shallow water requires scaled technologies that are less productive and more expensive than standard configuration. While dredging can restore the desired water depth, it is not without impact on sedimentation causes and, therefore, cannot guarantee avoiding sedimentation over time. Furthermore, dredging operations can often interfere with navigation and other nautical activities and imply environmental impacts on the marine ecosystem [1], like modifying marine habitat-related organisms and disturbing contaminants already in the seabed. Consequently, maintenance dredging operations often become too expensive and/or need to be allowed by normative framework due to the related environmental impact.

New approaches have been developed over the years as alternative methods to dredging, and a broad literature exists about innovative solutions to limit and/or solve sedimentation [1]. A promising solution alternative to maintenance dredging is the so-called “ejectors plant” technology. The ejector (see Figure 1) is an open jet pump (i.e. without a closed suction chamber and mixing throat) with a converging section instead of a diffuser and a series of nozzles positioned around the ejector. Each ejector is placed on the waterbed and transfers momentum from a high-speed primary water jet flow to a secondary flow, a mixture of water and the surrounding sediment. The sediment-water mixture is then conveyed through a pipeline and discharged in an area where the sediment can be picked up again from the natural water current or is not an obstacle for navigation. For example, with a primary water feeding flowrate of $\sim 27 \text{ m}^3/\text{h}$, a working pressure of $\sim 2.4 \text{ bar}$ and a discharge pipeline characterised by 60 metres in length, each ejector can convey a peak sand flowrate at the discharge pipeline of about $2 \text{ m}^3/\text{h}$ (whole discharge flowrate is $\sim 34 \text{ m}^3/\text{h}$) and a water pump power consumption of about 3.5 kW [2]. Ejector performance changes due to i) discharge pipeline length and ii) sediment characteristics.

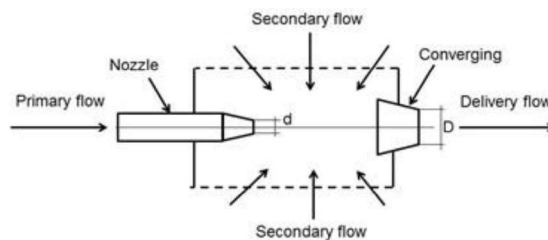


Figure 1 : Schematization of ejector geometry and operation.

The main novelty of the ejectors' plant is that it is designed and controlled to bypass the settling sediments and not to remove them from the waterbed. This feature is essential in authorisation and permit procedures since the mass balance in the area where the ejectors are installed can be considered zero. Therefore, the ejectors' plant operation is not equated to maintenance dredging. Moreover, the continuous operation of the plant reduces the environmental impact to near zero since the sediment

management follows the rhythm of nature. The technology is reliable as, generally speaking, jet pumps have been applied for coastal applications since the 1970s. Regarding the ejectors' technology, it was developed and tested in 2001 by the University of Bologna. In 2005, the first experimental plant [3] was realised and tested in the port of Riccione in Italy. In 2012, a second experimental plant [4,5] was implemented in Marina di Portoverde in Italy. Both installations were realised at harbour entrances and designed to handle sand. Recently, two further ejectors' plant installations have been realized in Italy. A pilot installation was established in 2018 in Cattolica [6], and is still running, where, for the first time, two ejectors were applied in the management of silt and clay sediments and installed in a river channel. The first demonstrative installation has been completed in 2019 in Cervia [2]. The 10-ejector demo plant operated continuously from June 2019 to September 2020, thus achieving the objective of the LIFE MARINAPLAN PLUS project, which financed the realization and monitoring of performance and impacts produced for a minimum period of 15 months operation.

The paper briefly introduces the ejectors' plant technology concept and then summarises the results of the monitoring actions implemented over time in the Cattolica and Cervia installations.

2. Techno-economic assessment of the ejectors' plant

The pilot plant in Cattolica has been designed to feed with pressurized water up to two ejectors. Each ejector is fed by its submersible pump. An inverter can control the water flowrate in each ejector feeding pipeline. Pressure transmitters monitor the water pressure at the pump outlet. An electric multimeter between the grid and the inverters measures power consumption. The pump operation can be scheduled hourly, while the plant operation can be remotely checked and modified. Instrument readings have a frequency of about one second. Still, data are saved only every five minutes in a local database that can be remotely accessible to limit the data storage size. The pumps are installed near the entrance of a towing basin, while the ejectors are located inside and outside the towing basin. The internal ejector has been numbered as ejector n°2, while the external ejector is the n°1. The electric panel has been installed very close to the pumps. Figure 2 shows the position of pumps, ejectors, and electric panel. The position of the ejectors is approximate since they were not fixed on the stream bed. During the 12 months of monitoring, the ejectors, particularly the ejectors n°2, were manually moved.



Figure 2 : Location of ejectors plant in Cattolica [6].

After more than one year of operation monitoring [6], the pilot plant effectively kept the water depth constant in the towing basin. The pilot plant worked for 8475 hours, and based on the relation between bathymetries and the operation regime, a mean power consumption of 5.5 kW can be considered optimal to guarantee navigability and limit energy costs [6]. Considering an ejector's plant lifetime of 10 years and yearly costs for operation and maintenance, a whole cost of 188,000 € over the 10 years has been computed (i.e. about 19,000 € per year) [6]. The cost is competitive with maintenance dredging, especially if indirect dredging costs (i.e. permit/authorization, sediment analysis, limitation of towing basin operation due to navigability issues) are considered. The pilot plant is still in operation and under continuous monitoring. Recently, the control strategy of the ejectors' plant has been slightly modified to optimize power consumption further. A water level sensor has been installed in Tavollo River to monitor the tide variation. The idea is to optimize the night operation of the plant by increasing ejectors' water flowrate feeding only when a falling tide is present since it can accompany well sediment transport to the sea. The new operation mode is still under evaluation, and the results will be published in a following paper.

The demonstrative ejectors' plant in Cervia was more complex, and its operation was accompanied by an extensive monitoring plan [2]. The main objective of the ejectors' plant installed in Marina di Cervia is to guarantee navigability at the harbour inlet while in operation. The plant consists of ten ejectors at the harbour entrance, as shown in Figure 3. There are two pumps, each one feeding five ejectors. Each pumping line has an auto-purging disk filter: the auto-purging cycle is activated once the pressure drop in the filter reaches a certain level. An inverter controls the total pumped water flowrate, while the flowrate for each ejector feeding pipeline is balanced through electro-valves. The total installed power is about 80 kW. A local meteorological station has been installed to relate plant operation with sea weather conditions (i.e. wind intensity and direction).



Figure 3 : Location of ejectors plant in Cervia [7].

The Cervia ejectors plant operated continuously from June 2019 to September 2020. Despite the numerous problems encountered [7], which have been solved or for which a technical solution has been identified, the effectiveness of the ejectors' plant is demonstrated by the ability of the plant to maintain a navigable channel with a minimum water depth of 2.5 m, measured to the mean sea level leaving the harbour; a condition previously never reached at the beginning of the summer season without dredging operation. Concerning efficiency, the ejectors' plant consumption was higher than expected: starting

from January 2020 until July 2020 (with a peak in June 2020), the uncontrolled growth of mussels in the pipes and filters considerably increased the pressure losses in the system, forcing the pumps to work with higher pressure, but with the same flow rate, compared to the operating conditions recorded in 2019. Various technical solutions alternative to chlorination are under evaluation to prevent the proliferation of organisms in the pipes, such as low-frequency electromagnetism. For this reason, based on the data collected in the first period of operation of the plant and the measured water flowrate for the whole monitoring period, it is possible to assess the average consumption of each ejector in normal conditions equal to 3 kW. Therefore, the annual consumption for the ten ejectors is approximately 252,000 kWh/year and about 55000 €/year of energy bill cost, while the annual maintenance cost is estimated at 16,500 € based on 15 months of operation reached during the LIFE MARINAPLAN PLUS project [8]. The ejectors' plant's annual operation and maintenance (O&M) cost is much lower than the mean yearly cost spent for dredging and other sediment management techniques (like sediment resuspension through dredger propellers) implemented in the area, which accounts for about 185,000 €.

3. Environmental assessment of the ejectors' plant

One of the main results of Cervia ejectors plant monitoring is related to the comprehensive monitoring of environmental impacts of plant operation, which includes i) integrity of seabed sediments and communities, ii) underwater noise, iii) greenhouse gases (GHGs) and pollutant emissions through life cycle assessment (LCA). Possible impacts of the ejectors plant on sediment characteristics, benthic and fish assemblages need to be assessed simultaneously at various spatial scales, encompassing the full extent of the environmental variability of the area where the ejectors are positioned. Sampling sites are located in one putatively impacted location in front of the Marina di Cervia and in four control locations, placed 600 m and 1200 m north, and 600 m and 1200 m south of the impact location, respectively (shown in Figure 4).



Figure 4 : Map of Cervia research area.

Two sampling areas (~800 m² each), 20–30 m apart, were defined within each location. In particular, the impact location includes two distinct areas: the ejectors (I1) and the outlets (I2). Changes in the time of the measured variables at each putatively impacted area were compared to the whole range of control areas. The use of the ejectors' plant technology resulted [9] in a reduction of the percentage of muddy fraction (Figure 5A) and of the organic matter content (Figure 5B) present in the sediment in the areas affected by the plant, compared to the initial values (samples taken in May 2018) conditioned by previous dredging), thus approaching the mean values observable throughout the study in the control areas.

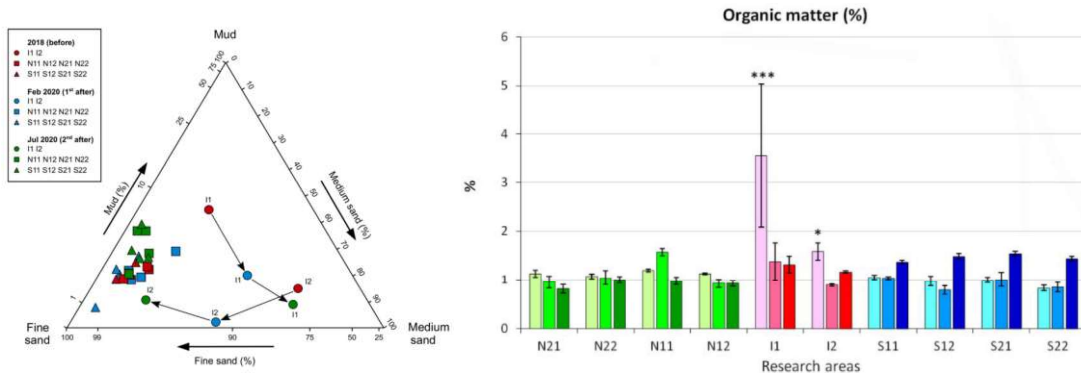


Figure 5 : Proportions of the sediment granulometric fractions: medium sand >250 μm ; fine sand 250–63 μm ; and mud <63 μm (A) and percentage in weight of organic matter in the sediment (error bars based on standard error) (B) [9]. Significant p -values are represented by the * ($p < 0.05$ —*, $p < 0.01$ —**, $p < 0.001$ —***).

Species richness of marine macro-invertebrates (as shown in Figure 6), initially reduced in the impacted area near the harbour, probably as a result of previously repeated dredging, significantly increased eight months after the ejectors' plant began operation (i.e. February 2020), although remained below the average for control sites, while the second sample analysis campaign revealed results in line with the control areas [9]. These results suggest an improvement in the ecological status of the marine ecosystem in the area affected by the plant within less than one year from the start of plant operation.

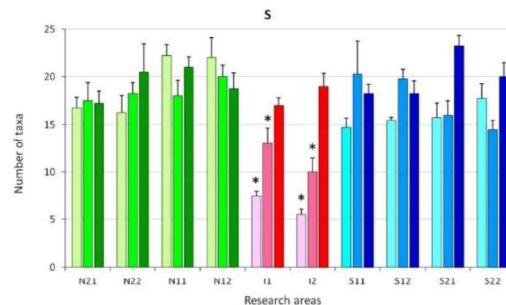


Figure 6 : Mean number of macro-invertebrate species per sample in benthic communities (error bars based on standard error) [9]. Significant p -values are represented by the * ($p < 0.05$ —*, $p < 0.01$ —**, $p < 0.001$ —***).

The impact of the ejectors' plant on underwater noise was assessed in September 2020, according to [10]. The acoustic measurements were carried out by a specialised operator and by using the SQ26-05 sensor, a pre-amplified hydrophone produced by Sensor Technology. The measurements were carried out on five sampling points (see Figure 7A): i) nearest point from the hydraulic pumps (B1), ii) 60 m from the hydraulic pumps (B2), iii) ~200 m from the hydraulic pumps and 150 m from point B2 (B5), iv) near the discharge point of the ejectors, approximately 50 meters away (M3), and v) ~185 m from point M3 (M4). Furthermore, the measurements were carried out with the ejectors' plant shut off and the plant in operation in three different conditions: manual control at two different speeds of the centrifugal pumps and automatic control (variable speed of the centrifugal pumps). While the assessment carried out in sampling points M3 and M4 relates to the impact on the open marine environment, sampling points B1, B2 and B5 were measured to evaluate the impact of submersible centrifugal pumps for Marina di Cervia customers. All the acoustic data were analysed through MATLAB software. The ejectors themselves had no impact on underwater noise level if compared with the 'natural' baseline, while only in the case of monitoring point B1 a difference was found between the noise levels in the recordings made with and without the hydraulic pumps in operation (see Figure 7B) [11].

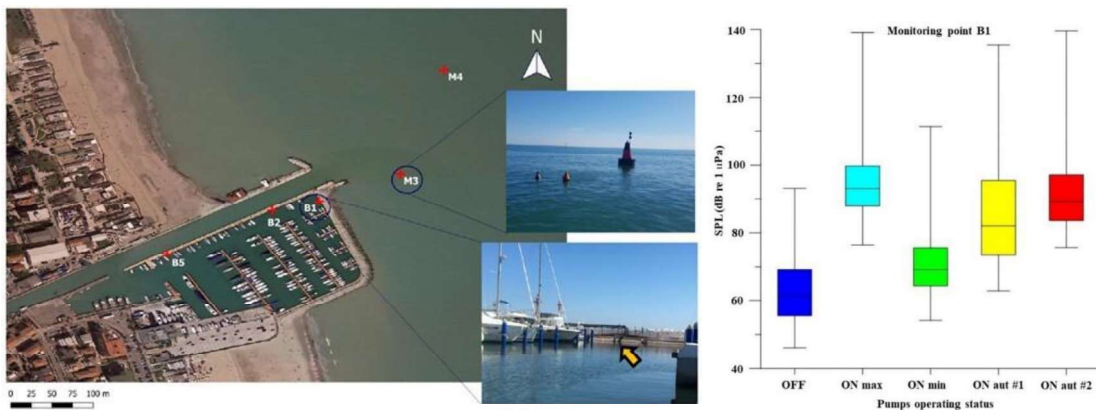


Figure 7 : Locations of the five measurement points (A) and box-plot of the average SPL values (on the ordinates) for the different operating states of the hydraulic pumps (on the abscissas) (B) [11].

Nevertheless, the data were subjected to the Mann-Whitney statistical test for non-parametric distributions to verify, in the presence of ordinal values from a continuous distribution, if two statistical samples come from the same population. The results obtained indicate that the difference between the measurements made with the inactive hydraulic pumps ('off' in Figure 7B) compared with the measurements made with the hydraulic pumps 'on' and at different operating statuses (max, min and automatic control in day #1 and day #2) is not statistically significant ($p = 0.12$, which is greater than the significance value of 0.05) and therefore not attributable solely to the activity of hydraulic pumps. The conclusion is that from the analysis of the acoustic data, it emerged that the impact of ejectors and hydraulic pumps on underwater noise level is insignificant in the harbour environment.

Finally, the impact of the Cervia ejectors plant construction and operation on GHGs and pollutant emissions was assessed through life cycle assessment (LCA), according to ReCiPe 2016 [12]. The

categories selected to describe the impacts caused by the emissions and the consumption of natural resources at midpoints are Global Warming Potential (GWP), fine particulate matter formation (PMFP), photochemical oxidant formation (EOFP and HOFP) and terrestrial acidification (TAP). The impacts are strongly related to ejectors plant efficiency and are influenced by i) mean power consumption and ii) emissions related to power source. In the case of the Marina di Cervia ejectors' plant, the system was fed by the grid. Therefore, the mean specific emissions of the Italian grid were considered. Two different scenarios have been analysed in [11], one with lower efficiency (scenario #1, or 10 ejectors operating with 6.3 kW mean power consumption per ejector) and one with higher efficiency (scenario #2, or 5 ejectors operating with 3.5 kW mean power consumption per ejector): the results are shown in Figure 8. Impacts can be strongly reduced, becoming near-zero, if the ejectors' plant is fed by renewable power, which may be locally produced and/or purchased by the grid (i.e. certified green power). The comparison with dredging equipment is under evaluation and will be published in a future paper.

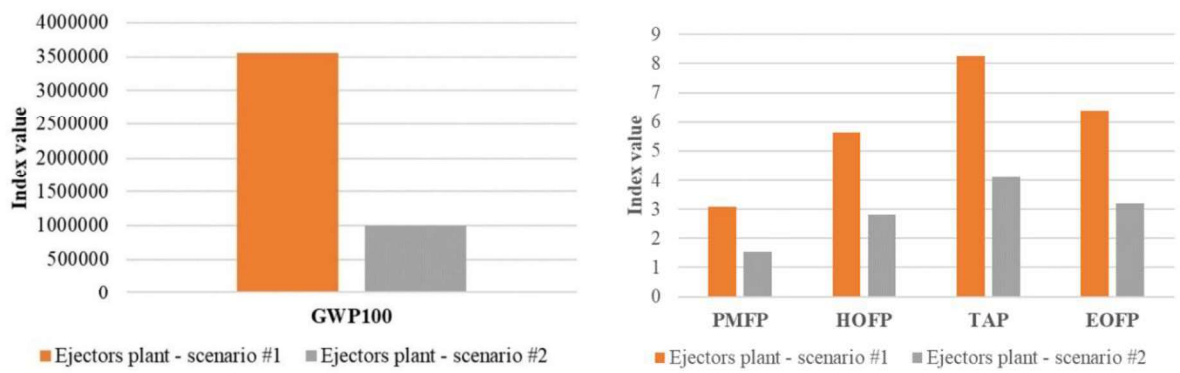


Figure 8 : Comparison of midpoint characterisation between the two scenarios [11].

5. Conclusions

The ejector's plant, an innovative technology for sediment management in water infrastructure, has been tested and validated in the last two years through demo plant applications at the port entrance of the Marina of Cervia and in the Tavollo River in Cattolica (being both installations in Italy). The monitoring activities involved several actions, which include effectiveness, efficacy, and environmental impact assessment. The ejectors' plant technology was demonstrated to effectively guarantee navigability over time at reasonable costs and with near-zero environmental impacts. In particular, compared with traditional dredging equipment, the ejectors' plant technology can effectively manage sediment without impacting marine flora and fauna; it reduces underwater noise emissions and, ideally, no pollutants and GHG emissions are released if powered by renewable energy sources.

References

- [1] Bianchini A., Cento F., Guzzini A., Pellegrini M., Saccani C., Sediment management in coastal infrastructures: techno-economic and environmental impact assessment of alternative technologies to dredging, *Journal of Environmental Management*, vol. 248, article number 109332, 2019.

- [2] Pellegrini M., Abbiati M., Bianchini A., Colangelo M., Guzzini A., Mikac B., Ponti M., Preda G., Saccani C., Willemsen A., Sustainable sediment management in coastal infrastructures through an innovative technology: preliminary results of the MARINAPLAN PLUS LIFE project, *Journal of Soils and Sediments*, vol. 20, pag. 2685-2696, 2020.
- [3] Amati G., Saccani C., Experimental plant for sediment management in harbours' areas (in Italian). In: *Proceedings of the XXXII National Conference on Italian Plant Engineering*, 6-7 October, Rimini, Italy, 2005.
- [4] Bianchini A., Pellegrini M., Saccani C., Zero environmental impact plant for seabed maintenance. In: *Proceedings of the International Symposium on Sediment Management I2SM*, 17-19 September, Ferrara, Italy, 2014.
- [5] Pellegrini M., Saccani C., Laboratory and field tests on photo-electric probes and ultrasonic Doppler flow switch for remote control of turbidity and flowrate of a water-sand mixture flow, *Proceedings of the XXIV AIVELA National Meeting*, IOP Journal of Physics Conference Series, vol. 882:012008, 2017.
- [6] Pellegrini M., Preda G., Saccani C., Application of an innovative jet pump system for the sediment management in a port channel: techno-economic assessment based on experimental measurements, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 8, art. num. 686, 2020.
- [7] Pellegrini M., Aghakhani A., Gaeta M.G., Archetti R., Guzzini A., Saccani C., Effectiveness assessment of an innovative ejectors plant for port sediment management, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 9, art. n. 197, 2021.
- [8] Pellegrini M., Guzzini A., Saccani C., Techno-economic assessment of the innovative ejectors plant technology for sediment management in harbours, *Journal of Soils and Sediments*, vol. 22, pag. 2844-2852, 2022.
- [9] Mikac B., Abbiati M., Adda M., Colangelo M.A., Desiderato A., Pellegrini M., Saccani C., Turicchia E., Ponti M., The environmental effects of the innovative ejectors technology for the eco-friendly sediment management in harbours, *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, n. 2, pag. 182, 2022.
- [10] Robinson S.P., Lepper P.A., Hazelwood R.A., *Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement*, National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate, 2014.
- [11] Pellegrini M., Preda G., Mikac B., Ponti M., Saccani C., Aghakhani A., Abbiati M., Colangelo M.A., LIFE MARINAPLAN PLUS project: sustainable marine and coastal seabed management, *Terra et Aqua*, vol. 162, pag. 28-39, 2021.
- [12] Huijbregts M.A.J., Steinmann Z.J.N., Elshout P.M.F., Stam G., Verones F., Vieira M.D.M., ReCiPe 2016. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report I: Characterization, National Institute for Public Health and the Environment, 2016.



Auteur principal :

LeBlanc, Phil, phil@econcretetech.com, EONcrete, Diputació 211, 08011, Barcelona, Spain

Co-auteurs :

Rosenberg, Yaeli, yaelir@econcretetech.com, EONcrete, Tversky St 8, Tel Aviv-Yafo, Israel

Gutierrez, Jorge, jorge@econcretetech.com, EONcrete, Diputació 211, 08011, Barcelona, Spain

Mots clés/Key words : Nature-inclusive design innovation, ecological engineering, nature positive port infrastructure, marine biodiversity

NATURE-INCLUSIVE PORT INFRASTRUCTURES

Résumé de l'article:

Pour construire des infrastructures inclusives de la nature, les ports ont besoin de technologies de construction innovantes et de nouvelles considérations en matière de conception qui vont au-delà des normes traditionnelles. L'utilisation des infrastructures portuaires comme outil à la promotion de la biodiversité représente un changement de paradigme de conception, par rapport à des mesures plus localisées telles que les récifs artificiels qui, souvent, ne font pas partie intégrante des infrastructures portuaires. Dans ce contexte, EONcrete s'est associé à plusieurs ports pour démontrer comment la technologie de l'éco-ingénierie peut être utilisée comme solution de conception inclusive à la nature pour promouvoir la création de divers habitats marins en tant que partie intégrante des infrastructures portuaires.

L'objectif de ces projets est de catalyser un changement fondamental dans les pratiques pour la conception et la construction des ports où les infrastructures sont intentionnellement conçues et activement utilisées pour promouvoir la biodiversité, répondre aux exigences de compensation environnementale, et soutenir la restauration de la santé et des services des écosystèmes côtiers et marins. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre les possibilités et les avantages d'une infrastructure portuaire respectueuse de la nature et de fournir des orientations et un modèle aux praticiens.

Cette présentation mettra en lumière les résultats écologiques et structurels de récents projets portuaires et examinera comment les technologies de construction innovantes, la collaboration en matière de recherche marine et l'engagement interactif des parties prenantes peuvent contribuer à façonner le rôle des ports afin de répondre activement à la nécessité de protéger la biodiversité marine.

Article's abstract:

To build nature inclusive infrastructure, Ports require innovative construction technologies and novel design considerations beyond the traditional industry standards. Leveraging needed port infrastructure to promote and enhance biodiversity represents a shift in design paradigm, compared to more localized measures such as artificial reefs that are often not a core part of the port infrastructures. This shift is driving Nature-Inclusive Design (NID) innovation with the goal to increase the ecological value of port infrastructures. In this context, ECOConcrete has partnered with several ports to demonstrate how eco-engineering technology can be used as NID solution to promote the creation of diverse marine habitats as an integral part of Port coastal and marine infrastructure.

The goal of these port-based projects is to catalyze a fundamental change in best practices for the design and construction of ports where infrastructures are intentionally designed and actively used to promote biodiversity, address environmental compensation requirements, and support the restoration of coastal and marine ecosystem health and services. The results are helping advance the understanding of the opportunities and benefits of nature inclusive port infrastructure and provide guidance and blueprint for practitioners. Ultimately, these projects are paving the way for new 'Blue' standards to be adopted to facilitate and accelerate the implementation of NID solutions at ports.

This presentation will highlight ecological and structural results from recent port projects and discuss how innovative construction technologies, novel marine research collaboration, and interactive stakeholder engagement can help shape the role of ports to actively address the need to protect marine biodiversity while meeting engineering and structural requirements. Specific project examples will also be presented where NID solutions were implemented to meet project environmental compensation requirements.

Article:

1. Introduction

Increasingly, the permitting and construction of port infrastructures requires the integration of compensation measures to reduce potential ecological impacts and create opportunities to enhance and restore marine biodiversity. Consequently, there has been a growing interest by stakeholders to integrate NID solutions into the designs and construction of port infrastructure projects (1,2,3). Port engineers are exploring how eco-engineered materials and technology can provide design solutions to address not only structural and engineering requirements of port infrastructures but also the need to promote native marine habitats, increase biodiversity and restore local coastal ecosystems.

Artificial structures have different physical, chemical, and biological characteristics than the natural habitats they replace, often resulting in a reduction, or complete removal of intertidal and shallow subtidal ecosystems (4).

At the same time, artificial hard substrates associated with port infrastructure offer a newly constructed habitat and, if designed correctly, can provide an opportunity for biodiversity enhancements. Structures can be designed with environmentally sensitive materials and additional complexity to support increased settlement, refuge, and feeding opportunities for a wide range of marine organisms.

Since 2012, EConcrete has been pioneering research and development of ecological structural solutions for coastal and marine construction (5,6,7). The core elements of EConcrete technology are a suite of science-based bio-enhancing concrete admixtures, complex surface textures, and nature-inclusive designs that act in synergy to increase the ecological value of coastal and marine infrastructure. This article presents results of port projects where EConcrete technology was applied to promote marine biodiversity as integral part of the infrastructures.

2. Nature-Inclusive Port Infrastructure Projects

2.1 Port of San Diego (US) – Eco-engineered coastal armor unit

In March 2021, EConcrete launched a three-year pilot project in the Port of San Diego to demonstrate an innovative design of an interlocking, 3.4 Metric ton precast concrete armor unit, the Coastalock. This interlocking, regularly placed, multidirectional, water retaining single layer concrete armor unit is designed to create well-defined local ecosystems that mimic natural rock pools and provide high hydraulic stability (Figure 1). For the pilot, Coastalock armor units were installed as armor protection in two sections of the port waterfront as replacement to traditional riprap rock mound. The pilot represented the first Coastalock installation in the world and included 74 interlocking single-layer armor units, to provide environmentally sensitive edge protection. By design, the unit allows to generate the creation of multiple different habitats (Figure 1).

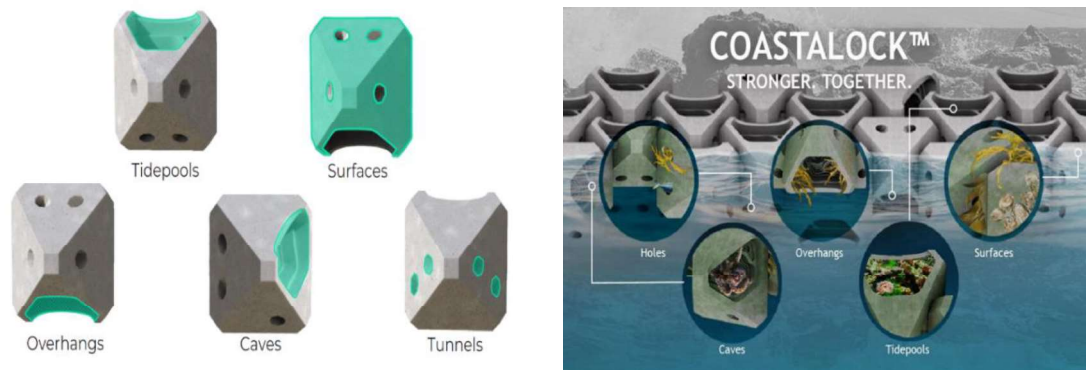


Figure 1. Coastalock installation orientation options to create multiple habitats

During the project, a two-year monitoring plan was conducted aimed at evaluating the biological productivity and ecological value of the Coastalock compared to the adjacent riprap rock at the two waterfront sites. The monitoring plan was structured to provide data with respect to; 1) Differences in diversity indices, including biodiversity, species richness, and species abundance; 2) Differences in successional stages and biogenic build-up; 3) Differences in water conditions between retained water within the units and nearby open water.

The results from the 2-year biological monitoring program show the community structure of the Coastalock have presented increasing trends of species richness and diversity throughout the monitoring events compared to the adjacent control rocks, which have been in place for decades (Figure 2). The CL cavities constitute a newly introduced water-retaining habitat that was missing at the riprap rocks. This new habitat enables the recruitment of multiple species of algae and invertebrates, resulting in the establishment of a diverse marine community. This effect is amplified in the upper row, which acts as a separate pool during low tide. The water-retaining feature enables multiple species of marine organisms to thrive in this newly introduced habitat that could not inhabit riprap rocks of the same tidal height (Figure 3).

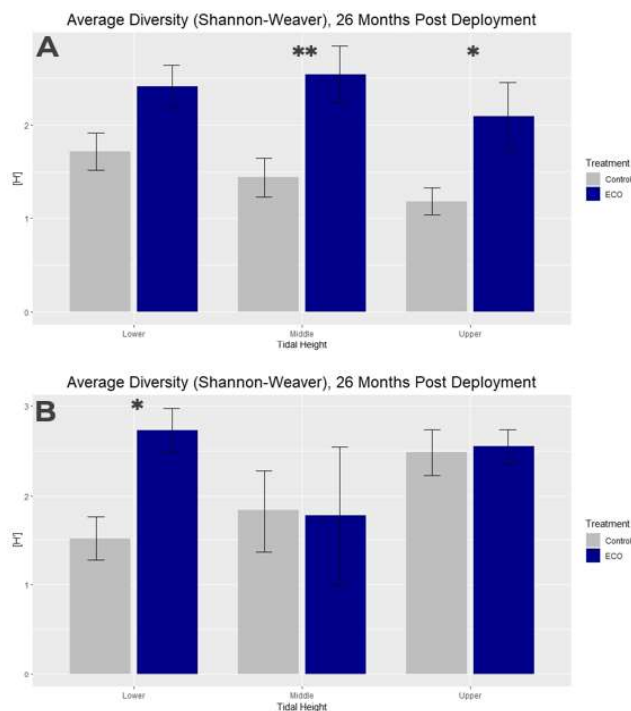


Figure 2. Figure 11. The difference of COUNT (A) or COVER (B) -monitored species diversity between ECONcrete CL deployed and the control rocks, at three different tidal heights, 26 months post-deployment. Error bars represent standard deviation. * = $p < 0.05$, ** = $p < 0.01$, *** = $p < 0.001$, **** = $p < 0.0001$.



Figure 3. Biological development on the Coastalock units 26 months post deployment

2.2 Port of Malaga (Spain) – Eco-engineered quay wall blocks

In 2022, EConcrete technology was integrated into the production of quay wall blocks for the construction of a vertical breakwater as part of the establishment of the new IGY marina infrastructure at the Port of Malaga. To enhance the ecological value and increase the biological productivity of the vertical concrete breakwater, EConcrete technology was used to produce the mass concrete blocks. The blocks were designed to maximize the complexity and the surface area of the concrete and create a stable, well-defined ecosystem that mimics a more natural environment (Figure 4). EConcrete's technology was embedded into the upper two rows, located above the sea surface and down into the subtidal zone, creating a more favorable tidal zone.

The preliminary results from the first biological monitoring event 13 months post-deployment show the community structure of EConcrete's blocks has significantly higher results, both in species richness and biodiversity, compared to the control blocks. The enhanced richness of EConcrete's blocks in this project is due to the prosperity of each species separately and together promoting a more stable ecosystem compared to the adjacent control that might be influenced by it, and yet didn't sow the same success. This is followed by the count-monitored species diversity showing a significantly higher result on EConcrete's blocks, which strengthens the claim for enhanced recruitment based on the design. The enhanced seawall was significantly more inhabited with suspension feeder species such as different Sabelidae, Serpulidae, and Spirobidae worm species, as well as Barnacles and Bivalves. Those species have the ability to remove suspended matter and different compounds from the water column, helping in aquatic remediation systems, decreasing anthropogenic nutrient input, and improving water clarity and quality (23,24).



Figure 4. IGY marina vertical breakwater, designed with EONcrete Mass Concrete Blocks. Left – at installation; center – 3 months post-installation; right – 13 months post-installation.

This project was featured in a recent report published by PIANC: Guidelines for Sustainable Recreational Navigation Infrastructure (2023). This report provides guidelines for a design process and illustrates project features that can achieve sustainability goals. It also outlines the benefits that sustainable infrastructure provides, as an economic engine with social and environmental benefits, in sustainable tourism, in large infrastructure projects, in urban waterfront projects, and as part of broad conservation strategies.

2.3 Port of Vigo (Spain) – Living Ports project

In 2023, the Living Ports project was launched at the Port of Vigo to demonstrate eco-engineered port infrastructures. EONcrete leads the project, an interdisciplinary consortium of 4 partners: EONcrete, DTU (Technical University of Denmark), Port of Vigo, and Cardama shipyard. The project is a large-scale deployment across two sites in the Port of Vigo: 1) 330m² EONcrete seawall panels with 90m² control, concrete-based seawalls. 2) 100 Coastalock units weighing 3.4 tons each, placed with a slope angle of 1:1 (Figure 5). The project also features a moored underwater observatory that provides the public interactive access to observe the marine life developing on the seawall structure. Biological and structural monitoring is being conducted by the Technical University of Denmark (DTU) and EONcrete and for the first time, noise pollution reduction of EONcrete infrastructure is being studied. Monitoring efforts will continue for two years with intervals ranging between 3-6 months. Results from 3 and 6 months post-deployment revealed that the community structure shows increasing trends of species richness throughout the monitoring events compared to the adjacent control rocks and seawall (Figure 6).



Figure 6. Biological development 3 MPD; (A) A crab of the specie *Necora puber* that found a shelter inside the Mangrove seawall pocket, the wall is covered with red algae (B) The dominant observed green algae (*Ulva* sp. and *Enterophormia* sp.) covering an Azuri seawall pocket with *Pomatoceros* sp. *polychaetas* and a small *Tripterygion delaisi* fish. (C) Azuri seawall covered with the dominant green algae species, with Barnacles and a Limpet on the clear grazed area. (D) *Pomatoceros* sp. *polychaetas* and a *Phallusia mammillata* tunicate within the CL cavity. (E) CL unit in low tide covered with *Ulva* sp. algae.

3. Conclusion

These port-based projects demonstrate that with the use of innovative materials and technologies, ports can achieve both structural and ecological goals when designing port infrastructure. In this context, EConcrete technology unlocks new opportunities to adapt the design of port infrastructures to meet environmental compensation measures and promote marine biodiversity.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)

Author: MARTINS João – joao.martins@arcelormittal.com – ArcelorMittal Sheet Piling
66, rue de Luxembourg, Esch-sur-Alzette – Luxembourg

Co-authors: THEIS Pascal – pascal.theis@arcelormittal.com – ArcelorMittal Sheet Piling

PRÜM Cécile – cecile.prum@arcelormittal.com – ArcelorMittal Global R&D

MATIAS DE PAULA José Humberto – jose.matias-de-paula@arcelormittal.com – ArcelorMittal
Global R&D

66, rue de Luxembourg, Esch-sur-Alzette – G.D. of Luxembourg

Keywords: sustainability, quay wall construction, steel solutions, Life Cycle Assessment

Construction of sustainable quay walls

Résumé

Dans le secteur de la construction, des producteurs de matériaux se sont engagés à réduire progressivement leur empreinte carbone avant d'arriver à la neutralité carbone avant 2050. Mais dès aujourd'hui les ingénieurs et investisseurs peuvent réduire l'impact environnemental de nouveaux ouvrages portuaires. **L'impact environnemental peut être calculé au moyen d'une Analyse du Cycle de Vie (ACV), une méthode scientifique transparente et équitable** qui permet de comparer des solutions alternatives. Il faut également évaluer le coût total du cycle de vie en prenant en compte les coûts de conception et de construction, l'entretien et la déconstruction, ainsi que les avantages découlant de la réutilisation et/ou du recyclage futur des matériaux.

Par ailleurs, les concepteurs doivent remettre en question leurs pratiques car leur objectif doit être le meilleur compromis entre l'impact environnemental et le coût d'une structure. L'inconvénient est que les études nécessiteront plus de temps et plus de ressources. Des méthodes de conception tombées dans l'oubli, telles que les murs de quai avec des ancrages sous le niveau de l'eau, peuvent conduire à des économies significatives de matières premières et à une empreinte carbone plus faible.

Actuellement, les matériaux « écologiques » sont généralement plus chers, p.ex. la production d'acier à partir d'électricité de sources renouvelables réduit d'environ 30 % le **Potentiel de Réchauffement Global (PRG)** des palplanches produites à partir de 100 % de ferraille dans un four à arc électrique.

Il en découle que les investisseurs publics et privés doivent adapter leurs procédures d'appel d'offres afin d'inclure un bonus pour les critères environnementaux. Aux Pays-Bas, une méthode de **monétisation** basée sur le **prix fictif d'indicateurs environnementaux** et d'un bonus écologique, appliquée depuis 2015, permet une comparaison équitable des différentes offres.



La traçabilité des matériaux et le suivi de l'ouvrage ne doivent pas être négligés: des données complètes et fiables sur la performance de la structure faciliteront la prise de décision en fin de vie: prolonger la durée de vie, réhabiliter ou remplacer l'ouvrage.

Une ACV réalisée par ArcelorMittal sur base d'une étude technique d'un bureau d'ingénieurs-conseils indépendant a démontré pour une étude de cas bien spécifique une différence de PRG de près de 50 % entre deux alternatives d'un mur de quai. Elle met en évidence l'influence des hypothèses de fin de vie, des bases de données et des Déclarations Environnementales de Produits à différents stades de la conception, ce qui peut conduire à des conclusions contradictoires.

Abstract

European governments have set their agenda for reaching carbon neutrality by 2050 latest. In the construction industry, manufacturers are under pressure and many already committed to a stepwise reduction of their carbon footprint before achieving carbon net-zero in 2050.

Design engineers and investors can reduce the environmental impact of new port structures. **The environmental impact of a structure can be determined through a Life Cycle Assessment (LCA), a transparent and fair scientific method to compare alternatives,** whereas their sustainability can be assessed through the Total Life Cycle Cost, considering not only design and construction costs but also maintenance, deconstruction costs, as well as benefits from future reuse and/or recycling of materials.

Designers shall continuously challenge their design practices, their goal being the best compromise between the lowest environmental impact and the cost of a structure. The drawback is more time consuming and resource intensive projects, due to extensive geotechnical investigations, design of more cross-sections, etc. Design methods fallen into oblivion, such as quay walls with anchors below water the water level, can lead to significant savings in raw materials, and consequently, to a lower carbon footprint.

Currently, materials with lower environmental impacts are usually more expensive. For instance, renewably produced electricity reduces the **Global Warming Potential (GWP)** of steel sheet piles produced from 100 % scrap in an Electric Arc Furnace (EAF) by approximately 30 %, but it is more expensive. Hence, public and private investors should adapt their tendering procedures to include a bonus for environmental criteria. In the Netherlands, a **monetisation method** based on the **shadow price** of environmental indicators is implemented since 2015. It allows a fair comparison of environmental criteria of different bids and allocates a predefined bonus.

Traceability of materials and monitoring of the structure should not be neglected: extensive and reliable data about the performance of a structure facilitates taking an informed decision at the End of Life (EoL): extend the service life, rehabilitate, or build a new structure.

This article focuses on an LCA performed by ArcelorMittal in collaboration with a Belgian consulting engineer that showed for a specific case study a **difference in GWP of almost 50 % between two quay wall construction methods** and highlights the impact of using



different assumptions for EoL, different databases or Environmental Product Declarations (EPD) at different design stages, which can lead to contradictory conclusions.

1 Introduction and aims

Buildings and infrastructure have a significant impact on worldwide greenhouse gas emissions (GHG). The main contribution to CO₂-eq. emissions comes from the embodied carbon of the materials used in buildings, roads, port structures, waterways, retaining walls, and so on. The estimated impact varies by source, but a good estimation is that the steel and concrete industries are very carbon dioxide (CO₂-eq.) intensive and account for around 15 % of the global GHG.

As an example, during the last decades, the quay walls in German ports have been executed with steel sheet piles and steel combi-walls. The environmental impact of these steel structures is already relatively low when using steel manufactured in an Electric Arc Furnace (EAF), a technology that was developed more than 30 years ago and that reduces drastically CO₂-eq. emissions by recycling scrap (steel). However, the steel industry still needs to address the steelmaking process based on iron ore which represents approximately 75 % of the worldwide production. The cement and concrete industries face a difficult challenge that can hardly be solved in the short term: many research projects have shown that slight reduction of the carbon footprint can be achieved during the next years, but the cement industry relies on a breakthrough technology to achieve carbon neutrality.

Some European governments have set as their goal the achievement of carbon neutrality by 2050, with an interim target of around 50 % reduction by 2030. To foster innovation and investments, governments will need to assist the heavy industries in their decarbonisation efforts, for instance by building the infrastructure to produce and transport the huge amounts of renewable electricity and “green” hydrogen that will be needed to decarbonise the steel industry.

Additionally, due to the ongoing and future investments, “green” steel (although there is no definition of it yet), which is in fact steel with “low(er)” carbon emissions is more expensive than the steel produced via the primary route, which consists in transforming iron ore into iron, and then into steel in a Blast Furnace and Blast Oxygen Furnace (BF/BOF). Forecasts show that steel with a carbon net-zero impact will be even more expensive. Major steel manufacturers have already vowed to achieve net-zero carbon emissions before 2050, with a clear strategy and roadmap. It is important to understand that this objective is slightly different from achieving carbon neutrality, and can be confusing, but this is outside of the scope of this paper.

Hence, in less than three decades, the key elements of infrastructure and buildings will have “almost” no environmental impact. But can the construction industry mitigate its environmental impact right now? For sure, it can reduce its impact through a few simple actions: reduce the use of natural resources, reuse components, recycle all the elements that are not fit for reuse anymore, Steel is a good example of circularity: 100 % of the recovered steel can be recycled in an EAF to produce new steel elements with at least the same quality and grades as the original steel (scrap). Furthermore, steel produced via the secondary route (EAF) has also a carbon footprint around five times lower than steel from the primary route BF/BOF.

Optimisation of the design and construction processes, improvements in the manufacturing processes, innovative and lighter structural elements contribute to preserving natural resources, and can be achieved in many cases with high yield strength steels, concrete with high compression strength, new shapes and geometries, etc. Designs of port structures can also be optimised by reducing the uncertainties on the soil characteristics (more borelogs), by analysing more cross-sections, etc.

Optimisation usually requires more human resources and may increase the complexity of the execution at the jobsite, but the ultimate goal for each project is to reach the best compromise between the lowest environmental impact and the cost.

2 Sustainable quay wall construction

The main challenge in the construction of quay walls (see example in *Figure 1*) and similar infrastructures is to deal with the uncertainties of the geotechnical parameters (variability of the soil properties, water levels,...) and actions (seismic events,...). Additional uncertainties are specific to the construction materials, such as steel corrosion rates in a marine environment. The optimisation of a retaining structure can be rather complex because apart from the uncertainties mentioned above, the length of the retaining wall elements, the position and the number of anchors, the length of the anchor wall elements and their distance from the headwall, all these parameters have a direct impact on the technical solution. An experienced engineer can solve a purely technical problem, but it gets more complex when adding the environmental impact as a key parameter.



Figure 1. Port of Ronne – Denmark. New cruise ship terminal (2019).

Do sustainability criteria add a layer of complexity? Additional parameters and scenarios need to be analysed in detail, but it is merely a new approach to design than additional workload. For instance, from a technical point of view, high strength steels and high strength concrete reduces the amount of (raw) materials needed and the total cost (there may be some exceptions), but is their environmental burden compensated by the reduction of the bill of materials? A complete Life Cycle Assessment (LCA) of several alternatives, based on Environmental Product Declarations (EPD) of the selected materials and/or products, is the right method to draw a fact-based conclusion. Though in the feasibility phase, this might be a legal challenge in the case of public works, it is always preferable to use EPDs of the materials/products that will effectively be used in the perspective project. Using unrealistic data or scenarios at the feasibility stage may exclude solutions that might end up having the lowest environmental impact.

Currently, one concern is the cost of products with a lower carbon footprint. It is a fact that these products are usually more expensive, be it because of the production processes or for other reasons. For instance, steel produced in an EAF consumes high amounts of electricity. In countries where the energy mix has high CO₂-eq. emissions, the manufacturer can purchase certificates of renewable electricity to “offset” the CO₂-eq. emissions of the grid. Depending on the steel product and manufacturer, switching to renewable electricity can reduce the CO₂-eq. emissions by 20 % to 40 %. However, the cost of these “Guarantee of Origin” certificates increases the overall production cost. In

the private industry, investors may accept to pay a premium, but in public procurement, the contract is usually awarded to the lowest bidder. To move in the right direction, the construction industry needs clear guidelines and methodologies, based on scientific facts, to determine the added value of solutions with lower environmental impact. As an example, the Dutch government introduced in 2015 a **monetisation** method based on the EMVI (*Economisch Meest Voordelige Inschrijving*), translated into English as the *Most Economically Advantageous Tender* (MEAT). It is based on the **shadow pricing of several environmental indicators** and applies to public tenders in the Netherlands for infrastructure and buildings. The method is briefly explained in Chapter 5.

3 Case study – cruise ship terminal

The main goal of the case study is to compare the environmental impact of two alternatives for the construction of a quay wall of a 200 m long cruise ship terminal in a Belgian port. The environmental impact is performed through an LCA. The alternatives are a steel sheet pile wall driven into the ground and a diaphragm wall (reinforced concrete). The design of the quay wall was subcontracted to the Belgian consulting engineers *Tractebel (Engie Group)* which is specialized in port design. The engineers considered the typical soil conditions of the Belgian coast (sand and silty clay) and assumed a service life of 50 years. The steel sheet pile and diaphragm walls were designed according to the relevant Eurocodes. The engineers analysed the execution aspects, potential deconstruction, and recycling of materials. Reuse was not considered because the probability to reuse elements of such structures after 50 years is quite low.

The designed sheet pile wall consists of a headwall and an anchor wall: AZ 46-700N, steel grade S 460 GP, 24.5 m long for the headwall, anchored with 30 m long tie-rods of 64 mm diameter, in steel grade S 500 and spaced 1.4 m apart, to a 7.5 m long anchor wall, using AZ 20-800 sheet piles in S 460 GP (see *Figure 2*). The diaphragm wall consists of an 800 mm thick reinforced concrete wall, 25.5 m long, and executed in concrete of class C35/45 using CEM I cement, anchored with two 22.0 m long active anchors spaced 1.5 m apart and with different inclinations.

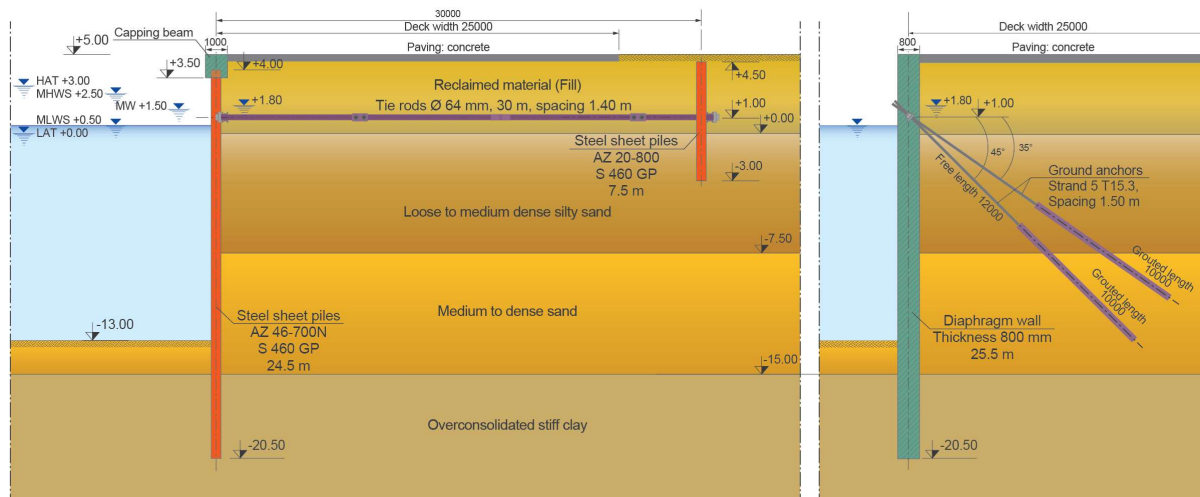


Figure 2. Case study - cross sections: steel sheet piles (left) and diaphragm wall (right)

4 Life Cycle Assessment of the case study

The comparison of the results of the LCA are limited to one of the key environmental indicators, the **Global Warming Potential (GWP)**, expressed in kg CO₂-eq., but in a more in-depth analysis, to



prevent shifting a burden from the GWP to other environmental impact categories, multiple environmental indicators must be considered. The construction cost and speed of execution were key parameters considered for the financial analysis. The original case study was carried out in 2019, and this paper is an extension that integrates new environmental data for the steel structure: over the last few years, several steel manufacturers launched products with supposedly lower embodied carbon.

The financial analysis showed that based on the cost price structure in 2020, the steel sheet pile solution was 15 % more cost-effective. The difference rose above 20 % when taking into account the service life and deconstruction phases.

The original LCA performed by ArcelorMittal's environmental specialists [1] underwent a peer-review by a panel of two French and one Dutch independent experts. The conclusion for the original base scenario is that over the complete lifecycle of the quay wall (Modules A – D), **the GWP of the diaphragm wall is 44 % higher than the one of the steel sheet pile wall**. The LCA considers the production (cradle to gate: modules A1-A3), the transport of the main construction materials to the jobsite (module A4), the installation (module A5), the end of life that includes the deconstruction and waste processing after the service life (module C), and benefits outside the system boundaries such as recycling of steel (module D). The assumption for steel sheet piles is that they can be recovered and 100 % recycled.

To limit the influence of statistical noise from mixing data from different databases, the LCA used Environmental Product Declarations in conformity with ISO and European standards (such as EN 15804 [2]) and publicly available in 2020 from the same program operator IBU-e.V. in Germany for EcoSheetPile [3], steel rebars [4] and concrete [5].

The main change in the analysis performed in 2022 is the use of steel sheet piles EcoSheetPile™ Plus [6] and steel rebars XCarb® [7] that replace the initial EPD for standard reinforcing bars produced with a mix BF/BOF and EAF [4]. EcoSheetPile™ Plus and XCarb steels are produced in an EAF with 100 % renewable electricity and from almost 100 % scrap. To meet the mechanical properties of the required steel grades, which are usually better than the ones from the original scrap, finetuning of the chemical composition is done in the Ladle Furnace (LF) by adding small amounts of alloys, and as a consequence, the recycled content of steel scrap is approximately 99 %. Another change in the LCA analysis is the use of an EPD from the Dutch MRPI program operator [6], which is due to the unavailability of an adequate EPD in IBU that covers the high strength steel grades of EcoSheetPile Plus. Finally, to simplify the analysis, only the production stages (Modules A1-A3) are discussed in this paper (see *Table 1*).

Table 1. Global Warming Potential (GWP) of the materials based on EPDs (finished product)

EPD	EPD Program Operator	GWP - Modules A1 - A3	
		GWP	Unit
EcoSheetPile™ Plus (EAF)	MRPI (NL)	368	kg CO ₂ -eq. / t
EcoSheetPile™ (EAF)	IBU (DE)	520	kg CO ₂ -eq. / t
Rebars (mix EAF & BF/BOF)	IBU (DE)	1 230	kg CO ₂ -eq. / t
Rebars XCarb® (EAF)	IBU (DE)	300	kg CO ₂ -eq. / t
Concrete C35/45	IBU (DE)	244	kg CO ₂ -eq. / m ³

The base scenario of the LCA shows a lower carbon footprint of Modules A1-A3 of the EcoSheetPile Plus wall, the difference being 32 % compared to standard steel sheet piles EcoSheetPile (see Figure 3). The use of XCarb® rebars reduces the carbon footprint of the diaphragm wall, the difference here is 37 %. The impact of renewable energy on the steel elements decreases the gap between the steel sheet pile solution and the diaphragm wall solution from the original +76 % to +69 %. **The use of renewable electricity for the production of steel elements does not change the conclusion from the original analysis: the sheet pile solution has still the lowest carbon footprint, the difference being now 69 % (Modules A1-A3). Renewable electricity reduces the CO₂-eq. emissions for both alternatives** but switching from the EPD with a mix of EAF and BF/BOF routes to a pure EAF route in combination with renewable electricity (XCarb rebars) has a higher impact on the diaphragm wall solution, although the quantity of steel rebars in the diaphragm wall is relatively low.

Note that the new version of the LCA has not yet been peer-reviewed.

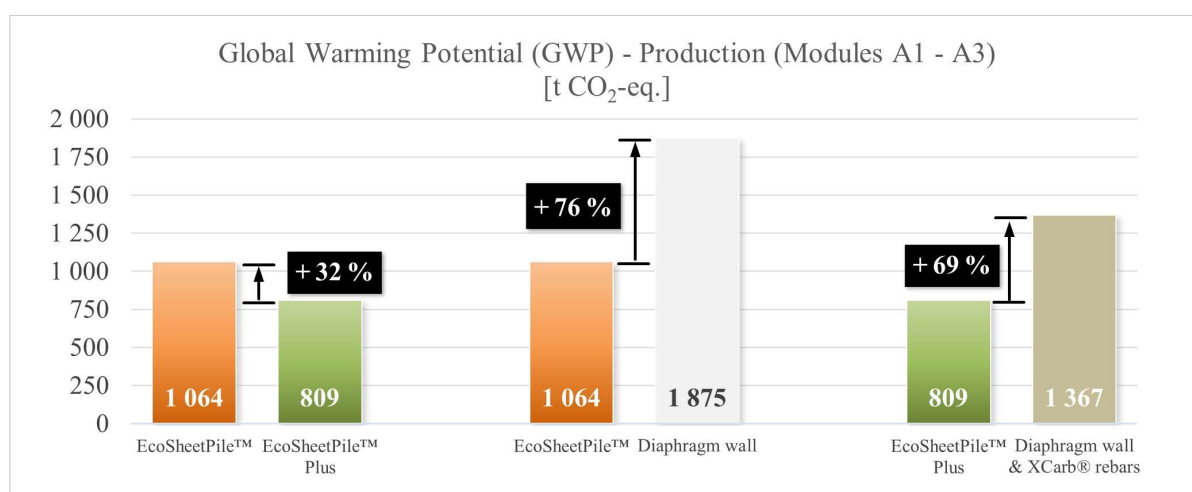


Figure 3. Comparison of the Global Warming Potential of the different solutions (Modules A1-A3)

A sensitivity analysis will also consider the influence of a few key parameters, such as the reduction of the sheet piles thickness due to corrosion. Additionally, the use of low carbon emissions concrete compatible with a marine environment will complete the LCA in a next phase.

It is also important to note the difference between the results of the whole lifecycle (Modules A – C and D) compared to the production phase (Modules A1-A3). The original LCA considered the whole lifecycle and the difference in CO₂-eq. emissions between the two alternatives was 44 %, which is less than 69 % in the above analysis. The explanation is quite simple and yet a little confusing for a layman: generally speaking, the contribution of Module D (benefits beyond the system boundaries) for EAF steel has a positive value, even when 100 % of the steel is recycled at the end of life! Indeed, the production of one tonne of steel requires more than one tonne of scrap, whereas at the end of the lifecycle, there can be a maximum of one tonne of scrap available for recycling, so that the “benefit” beyond the system boundaries is effectively treated as a “burden” to the environment. Neglecting the potential burdens of Module D in similar cases does not reflect the physical environmental impact of a product.



5 Public procurement – monetisation of environmental criteria

Public authorities can foster the use of construction materials and products with a lower environmental impact, by adding simple, yet robust environmental criteria into the procurement processes, and rewarding the contractors that work out solutions with the best compromise between cost, environmental and social impacts. These additional non-financial criteria can be implemented through different methods, for example, a *monetisation* method. The **shadow price method in the Netherlands** [8] transforms multiple environmental indicators into a **single economical cost indicator (ECI)**, which in turn is used to calculate a **fictitious credit (bonus)** to be added to the financial bid. It is a simple, transparent, and quite fair approach to compare alternatives at each stage of the project. The public authorities include a bonus (premium) in their tenders that varies from 5 % to 15 % of the overall estimated cost for bids that achieve the predefined minimum environmental impact (ECI score). This approach is as well a very efficient incentive for manufacturers and contractors to reduce their environmental footprint. Along with the low carbon footprint criteria for products, transport modes and short delivery routes should be additional criteria to be applied in these tenders.

As an example, in the Dutch method, the weighing coefficient for 1 tonne of CO₂-eq. emissions is 50 €, but this value can be adapted for each project. The method considers other environmental indicators than CO₂-eq., thus preventing a shift of a burden from the carbon emissions to other environmental indicators that may be as detrimental to humans or to the planet. To ensure a fair and unbiased comparison, the Dutch method uses exclusively national EPDs [9] and environmental data from the Dutch NMD [10]. Generic environmental data (non-product specific) from the NMD are penalized by using a specific penalty factor to account for uncertainties. Finally, offers that exceed a specific ECI threshold may be simply discarded.

6 Reduction of the use of natural resources - Design optimisation

Design optimisation encompasses the choice of safe, yet representative geometries, soil properties, and actions such as vertical surcharge loads. The dredge level has a non-neglectable impact on the design, so it should be based on realistic future operations of the quay wall, rather than designing for unrealistic / potential larger vessels. The reduction of the carbon footprint can as well be accomplished through innovative solutions, improving design standards, or analysing enough cross-sections to adjust the solution (i.e. the steel profiles and their lengths) to the variable soil properties along the quay wall.

Quay walls with two or more anchor levels, where at least one is below the seawater level, can result in substantial savings in the consumption of (natural) resources. However, this concept has fallen into oblivion, most probably because the installation procedure is slightly more complex and riskier. Although it was often used a few decades ago in France and abroad, today, hardly any contractor is keen on installing tie rods a few meters below the mean seawater level. A quay wall for a cruise ship terminal in the Port of Ronne in Denmark (see *Figure 4*) executed in 2019 is kind of an exception.

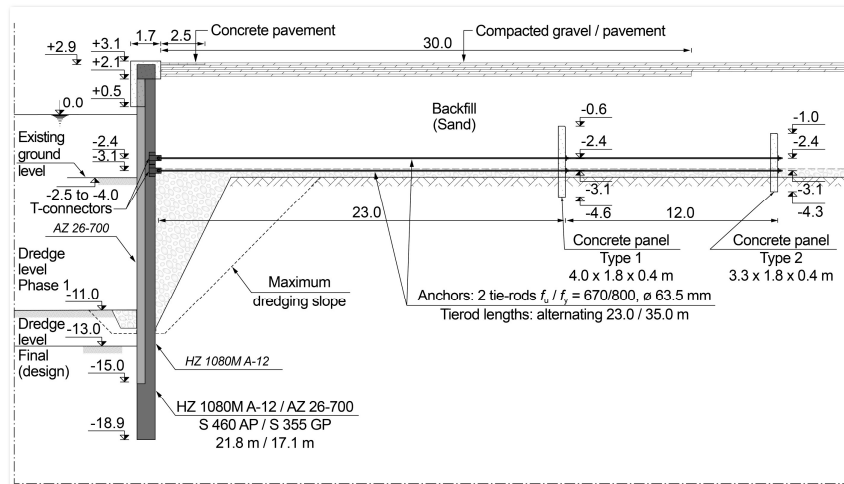


Figure 4. Quay wall with tie-rods installed below lowest water level - Port of Ronne, Denmark (2019)

The significant reduction of the bending moments and of the length of the sheet piles allows using lighter and shorter sheet piles. It might be even possible to switch from a heavy combined wall system (i.e. HZ-M type) to a standard corrugated sheet pile wall (Z or U-type). In any case, it results in cheaper construction, less consumption of steel and consequently, a lower environmental impact.

Finally, design optimisation may require extra human and financial resources, but without a doubt, it preserves natural resources. One drawback is the reduced flexibility for later upgrades, for instance, to repurpose the structure (i.e. due to higher variable loads, new applicable design standards, higher dredge level,...), or to cope with unexpected actions / events that can occur during the execution / installation phase, such as obstacles in the ground, local soil irregularities,....

7 Conclusions and perspectives

The new Life Cycle Assessment proves that it is possible to further reduce the carbon footprint of the construction of quay walls by at least 20 % by using construction products with a lower environmental burden. Steel produced from scrap in an Electric Arc Furnace with 100 % renewable electricity reduces the carbon footprint of a quay wall, whether it has been executed with steel sheet piles (difference of 32 %) or with a diaphragm wall reinforced concrete (difference of 37 %). In the base scenario of the case study analysed in this paper, **the LCA limited to the production stage (Modules A1-A3) shows that the steel sheet pile solution has a lower carbon footprint compared to a diaphragm wall, the difference being 69 %**. However, these findings cannot simply be transferred to other structures or to other locations due to the influence of local parameters such as soil conditions, etc.

Products with low carbon emissions tend to be more expensive, hence, public authorities and private investors will play a major role in the achievement of the decarbonisation of the construction industry: they shall develop fair, unbiased, and transparent evaluation methods and tender procedures that reward products and solutions with the lowest environmental impact. The Dutch **monetisation method, based on the shadow prices of environmental indicators**, can serve as a template for developing a method in other countries.



8 References

- [1] ArcelorMittal R&D (2019). *Comparative study of Steel Sheet Pile and Concrete Slurry wall in quay infrastructure application – Life Cycle Assessment methodological report*. ArcelorMittal.
- [2] EN 15804:2012+A2:2019. *Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products*. CEN.
- [3] ArcelorMittal Commercial RPS (2018). *EPD. EcoSheetPiles™*. IBU e.V.
- [4] ArcelorMittal Europe (2016). *EPD. Reinforcing steel in bars*. IBU e.V.
- [5] InformationsZentrum Beton GmbH (2018). *EPD. Beton der Druckfestigkeitsklasse C 35/45*. IBU e.V.
- [6] ArcelorMittal Projects (2023). *EPD. EcoSheetPile™ Plus*. Stichting MRPI.
- [7] ArcelorMittal Europe (2021). *EPD. XCarb® Recycled and renewably produced reinforcing steel in bars*. IBU e.V.
- [8] Nationale Milieu Database (2022). *Environmental Performance Assessment - Method for Construction Works. Calculation method to determine environmental performance of construction works throughout their service life, based on EN 15804*. Nationale Milieu Database.
- [9] Stichting MRPI (2023). [Online]. Available: <https://www.mrpi.nl>. [Accessed June 2023].
- [10] Nationale Milieu Database (2023). [Online]. Available: <https://milieudatabase.nl>. [Accessed June 2023].

Ref. Author: Margherita Carmen Ciccaglione - University of Naples Federico II (Naples, Italy)-
margheritacarmen.ciccaglione@unina.it

Co-authors:

Sara Tuozzo - University of Naples Federico II (Naples, Italy) – sara.tuozzo@unina.it

Marco Di Stefano – SISPI Engineering (Naples, Italy) – marco.distefano.ing@gmail.com

Mariano Buccino – University of Naples Federico II (Naples, Italy) – buccino@unina.it

Mario Calabrese - University of Naples Federico II (Naples, Italy) – calabres@unina.it

Key words: wave impact loads, vertical structures, large-scale physical tests

Extreme events and importance of their identification: the study case of Salerno Port

Article's abstract: Vertical breakwaters are frequently employed for the protection of ports or coastal areas. It is known that, above all, repeated breaking wave impacts on a dike wall can cause the breach of the structure, and consequently, the total failure. This is usually experienced when in shallow water conditions, or for structures with large mounds and wide berms. Therefore, a proper prediction of impact loads on vertical walls is essential for the design of such structures, already during the preliminary phases. This study aims to guide engineers and designers in accurately identifying impact loads on vertical structures, highlighting the importance of avoiding potential underestimations. In this regard, a special focus is given in this paper for the study case of the Salerno Port, which faces the homonymous Gulf in southwestern Italy. Since it plays a fundamental role in the transport system of the whole south-central Italy, detailed interventions for the expansion of docks, the excavation of the seabed and the widening of the port mouth have been planned, to adapt the infrastructures to the advent of ever larger ships. To this aim, an extension of 200m of the principal pier (with an angle of 18° with respect to the latter) has been considered, by laying five REWEC3®-type caissons, to produce alternative energy. However, both the laying depth and the structure geometry could likely trigger violent impact loads on the structure, which occurrence could have threatened the effective implementation of the project. Therefore, a large experimental campaign has been carried out by the HR Wallingford, properly reproducing the 200m REWEC3® extension, to reliably evaluate the occurrence of impact loads. Physical tests detected, inter alia, violent impact loads on the caisson face, particularly on the REWEC3® cells, reaching local values 10 times greater than those given by literature formulations. As a result, careful revisions have been needed, including deepening of the head seabed to -14.5m, resecting of caissons septa at the REWEC3® cells, strengthening of both wave wall and the internal sections to account for impacts.

1. Introduction

Vertical breakwaters are commonly used to protect harbour areas worldwide, with a significant number of them being built along the Italian coast, in Europe. Typically, these defence structures consist of a

single, vertically oriented concrete caisson that is located atop a rubble mound foundation. The noteworthy success of this structural typology can be ascribed to several contributing factors. Primarily, this type of breakwater proves to be a superior choice, particularly in deeper waters. It offers advantages in terms of performance, construction speed, standardization, environmental impact, as well as construction and maintenance costs, when compared to the more traditional rubble-mound structures.

Despite their considerable achievements and established utility, these structures are vulnerable to catastrophic damage caused by storms, as evidenced by [1]. Indeed, although failures stem from various, intricate factors (e.g. [2]; [3]) encompassing hydrodynamic, geotechnical, morphological, and structural aspects, wave breaking stands out as the most prevalent source of damage, even in scenarios where depth-induced breaking is not expected. Moreover, since high irregularity and short-crestedness of real sea states strongly affect breaking, its occurrence cannot be totally avoided, even in deep water conditions. Hence, it becomes evident that a precise analysis must be carried out to prevent reconstruction scenarios, which, in the case of vertical structures, would involve costs that are likely 2 to 3 times greater than the original construction ones [4].

In this frame, the Salerno port mouth adaptation project takes a central stage. This project was needed for bringing one of the key ports in south-central Italy in line with the increasing size of ships, thereby enhancing its economic and commercial significance. Particularly, the installation of a series of REWEC3®-type caissons [5] for alternative energy has been considered, to provide additional benefits to the economies of the area. Nonetheless, during the design phase, the possible occurrence of severe impact loads on the structure was identified, producing a potential threat to the successful realization of the project.

This study is aimed at leading engineers and designers towards the accurate identification of impact loads on vertical structures, while emphasizing the significance of avoiding their potential underestimation. The case study of the Salerno port provides a relevant context for understanding this matter. In the following, after providing a contextual overview of breaking wave loads, the Salerno port project will be outlined along with its identified critical aspects. Then, the experimental campaign by the HR Wallingford will be briefly resumed, and careful revisions of the project described.

2. Identification of breaker on vertical structures

A primary objective concerning researchers over the latest decades was to identify the main shapes assumed by the wave surface at the wall [6 and 7]. [4] adopted a wave grouping based only on the characters of the hydro-dynamic actions, dividing the waves at the structure in the following four major groups:

- I. *Quasi standing waves*. This condition is given by non-breaking waves reflecting on the wall. Pressures and forces gently vary in time, oscillating to a greater extent than the caisson.
- II. *Slightly breaking waves*. Include those waves that start to break in front of the breakwater as an upward deflected breaker. The force time history generally shows a double peak the first of which is higher than the second one.
- III. *Wave impacts*. This condition occurs when the waves break directly on the structure with almost vertical front surface at the moment of impact or as a plunging breaker with small or large

cushion of air inducing loads of much greater intensity and shorter duration than the quasi-static loads. The force history generally exhibits an impulsive zone characterised by high forces with shorter duration followed by a longer-lasting quasi-static force.

- IV. *Broken waves.* In this case the collapse breaking point is far enough in front of the wall. This loading case exhibit small impact pressures and total forces.

The breaking criterion proposed by [4], was used to refine the Parameter Map ([4] and [7-9], important engineering tool, originally introduced by [10a,b], aimed at improving the reliability of the design procedures of vertical breakwaters and making informed decisions regarding the expected design wave conditions at the structure. By considering new dataset of experimental tests, the authors found out particular combinations of wave conditions, bottom slope, berm and vertical wall profile on the generation of impact loads, as shown in Figure 1.

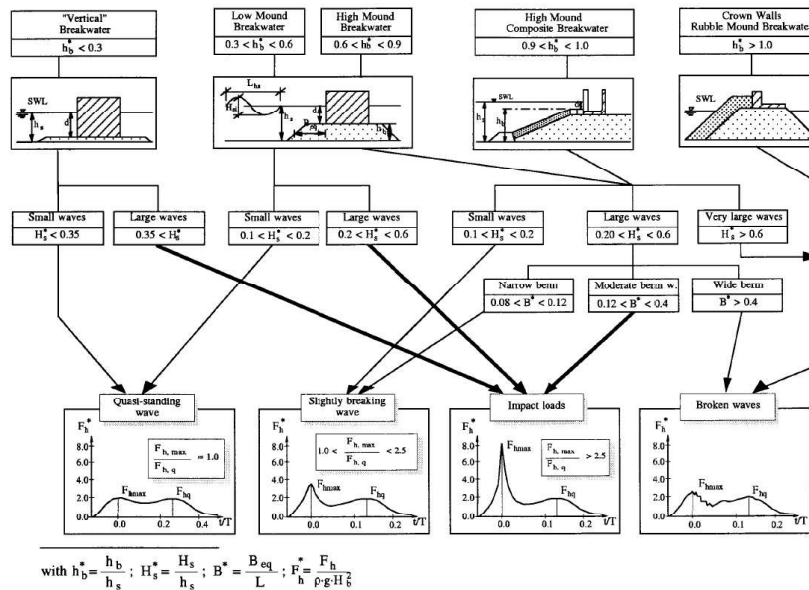


Figure 1 – the Parameter Map from [4]

As evident, the occurrence of impact load conditions gets concerning in situations characterized by large waves and becomes particularly critical when combined with a foundation mound characterised by moderate dimensions.

The method is worldwide recognised as a reliable tool for prediction of possible loading cases in front a simple vertical or composite breakwater; however, for peculiar cases, it is conceivable that predictions may necessitate reliance on either physical or numerical models.

3. The Salerno Port

Salerno, a city with a rich maritime heritage, homes one of the most significant port areas of central-southern Italy, involving the commercial zone known as 'Molo Manfredi' and the tourist port named

'Molo Masuccio Salernitano'. It faces the homonymous Gulf in southwestern Italy, and represents a critical nodal point for the logistics of import/export businesses dealing with many different goods (e.g. the FCA, Fiat Chrysler Automobiles, new cars pass through this port).

From its inception, the Port of Salerno has experienced ever-increasing growth, a trend that remains active even to the present day, attracting ever larger businesses. However, the evolution of maritime transport and the related designs of ships necessitate the accommodation of larger vessels (with a deeper draught) compared to those that can operate at Salerno. Therefore, an adaptation was needed to ensure their secure entry, transit, and mooring within the port.

Starting from 2010, Campania Region approved the functional-technical adaptation of the port, including the expansion of docks, the excavation of the seabed and the widening of the port mouth. The latter aspect turned out to be particularly challenging, as the initial phase of the project revealed specific drawbacks linked to the occurrence of impact loads on the structure. A detailed description is given in the following section.

4. The functional-technical adaptation of the Salerno port

The preliminary project developed in 2010 aimed at ensuring continuity with the existing structure while simultaneously enhancing its performance. A decisive factor for the chosen design solutions was the interplay between significant project actions and the characteristics of the poor foundation soils. Then, the solution considered an extension of 200 meters of the principal jetty, following an inclined alignment of 18° with respect to the jetty. This extension was finally planned through the installation of 5 cellular caissons of the REWEC3®-type, aimed at generating alternative energy. Each caisson has an overall length of 32 meters, a body width of 22.50 meters and a variable height since the first three caissons reach 13m, while the last two 11m to create a transition between new and existing structure. However, this aspect determined an irregularity step, as shown in Figure 2b. Therefore, installation seabed reaches a depth of -11.50m for caissons n. 1, 2 and 3, while caissons n. 4 and 5 a depth of -9.40m. Moreover, caissons are positioned atop a 4m *tout-venant* vibro-replaced layer (deepened in the first contribution to the conference [11]), while the foot is protected through a rubble mound of 7m wide and 3m high (Figure 2).

The final project submitted for the bidding process received a positive opinion, with some prescriptions by the Technical Advisory Committee (CTA). In fact, the relevant dimensions of the toe-protecting berm, along with the large wave conditions at the structure, led to suspicions of highly impulsive actions, according to the parameter map approach discussed in the above paragraph.

Therefore, the CTA suggested that, above all:

[...] "Verify, along the entire development of the caissons of the pier the occurrence of violent impulsive actions on the structure caused by breaking waves, by means of physical model tests. In the presence of strongly impulsive breaking waves, as indicated by the Technical Instructions of the Council for Public Works, the vertical wall configuration is not suitable. In the presence of breaking waves, in Europe, the preferred structural configuration is the rubble mound breakwater."

and then:

[...] if the occurrence of violent impulsive load is ruled out, but the occurrence of breaking waves on the wall-type breakwater is confirmed, perform a thorough probabilistic analysis of the risk of collapse of the breakwater using a dynamic approach in addition to the conventional pseudo-static stability verification.

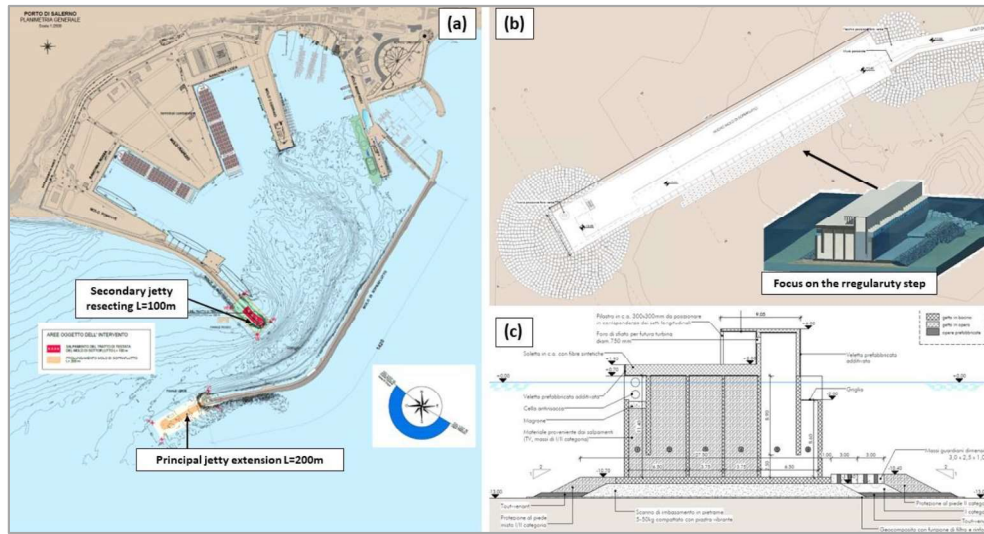


Figure 2 – (a) General plan of the technical-functional improvement project for the port of Salerno. (b) Detail of the extension of the main pier. (c) Section of the REWEC3®-type caisson.

Consequently, according to the instructions issued by the CTA, the design phase was further improved by conducting physical tests on three-dimensional models. These tests were carried out within the experimental basins at HR Wallingford. The primary aim was to evaluate the impulsive forces exerted on the structure due to breaking waves, along with assessing the stability of the caissons when subjected to such forces.

4.1. The experimental campaign by HR Wallingford

The physical model was constructed at a geometric scale of 1:40, reproducing the extension of the jetty for a length of about 200 m. The model also incorporated representations of the cellular caissons equipped with REWEC3® cells (see Figure 3 a and b). Moreover, segment of the existing port jetty was integrated to simulate its effect on wave transformation and to analyse the hydraulic behaviour of the transitional section between the two structures (existing and future).

Namely, the study aimed to determine:

- the wave actions on the REWEC3® caissons, particularly focusing on evaluating the conditions of impulsive pressure that can occur along the front face of the structure, especially on the partitions exposed to the direct wave motion;
- the reflection coefficient of the new REWEC3® caisson structures.

- the hydraulic stability of the extension against waves, specifically concerning the stability of the foot protection blocks and the stones composing the toe-protecting berm;
- the overtopping flows at key positions along the structure;
- the wave diffraction within the dredged channel at the head of the structure.

The hydrodynamic pressures acting on the external vertical face, at the base of the caisson, and at the entrance of the REWEC3® cell were measured using a pressure sensor system (Figure 3c). This system allowed for the assessment of the intensity of hydrodynamic loads induced by the incident wave motion on the structure. Additionally, it provided information about the spatial variability of both impulsive and pseudo-static loads.

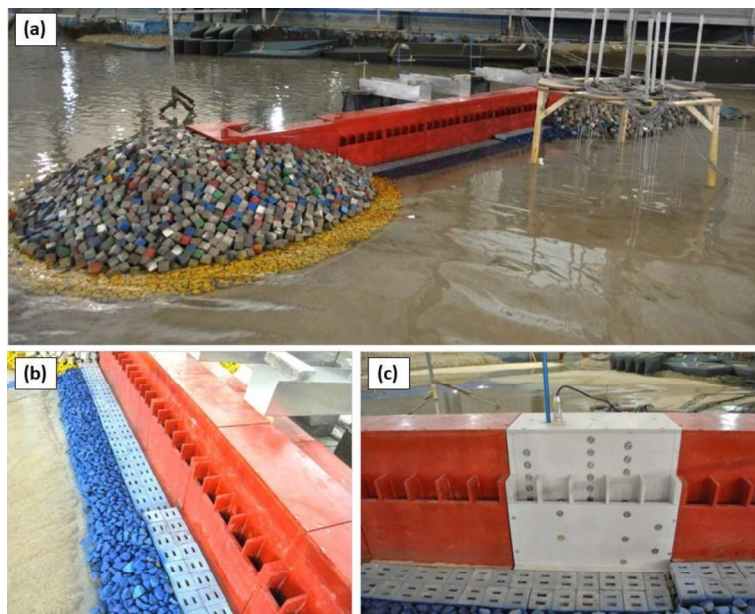


Figure 3 – (a) general overview of the physical model for the pier extension of Salerno Port (b) irregularity step (c) pressure sensor systems placed at caissons

In addition to the geometric variations of the structure, the pressure sensors were redistributed along the structure at the transverse membranes of the empty chambers and the internal covering. This redistribution aimed to improve the monitoring of the stresses acting on the structure.

Finally, experimental tests (Figure 4) revealed global actions on the caisson lower than the design forces determined using the Goda/Sainflou theory, thereby not compromising its overall stability. However, impact loads have been detected at the locations of the REWEC3® cells and specifically during the crest phase (Panels (b) and (c) of Figure 4). Notably, peak values exceeded those estimated by literature formulas by more than 10 times, highlighting potential local vulnerabilities of the caisson's structure. In addition, despite the good hydraulic stability of the toe protections, some critical issues have been detected at the irregularity step (Figure 4a).

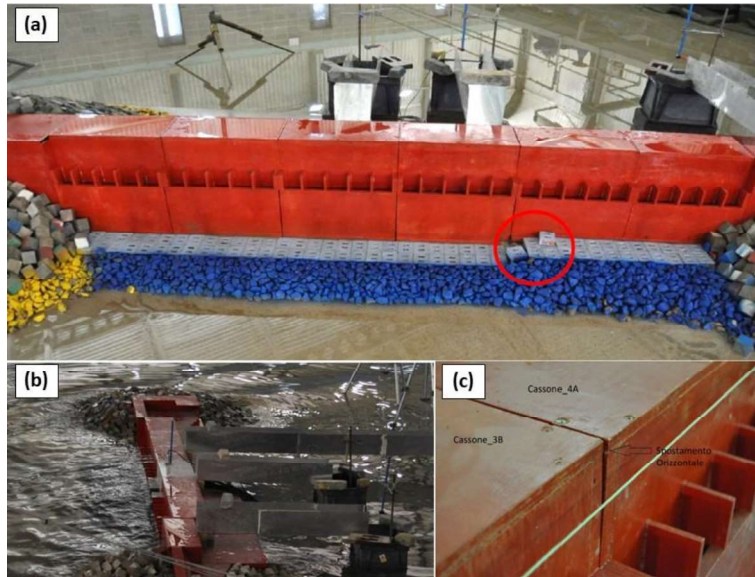


Figure 4 – experimental tests results. (a) particular of the damage at the irregularity step (b) frame of a test (c) damage undergone by caissons

5. Salerno port project adjustment

Given the results of the experimental campaign, a substantial number of the concerns raised by the CTA were validated, leading to the implementation of several modifications in the project.

First of all, levelling of the seabed of the 5 caissons to a uniform elevation of -13 meters have been modified, and consequently the foundation was aligned at an elevation of -11.40 m. Then, caissons No. 4 and No. 5 have been extended in height to align them with the consistent foundation level at an elevation of -11.40m.

Moreover, given the significant impact loads, on the one hand the partitions of the REWEC3® cells have been resected, to reduce the vulnerability of the structure. On the other hand, an increase of reinforcements in the sections experiencing higher stresses was needed to account for the loads resulting from the impulsive actions.

Finally, a deepening of the head seabed to a depth of -14.5m to account for the designed dredging interventions of the seabed.

6. Conclusions

Despite considerable success and established utility of vertical wall structures in protecting port and coastal areas, they can be vulnerable to catastrophic damage caused by breaking waves and their possible related impact loads. Literature provides well reliable tools for the preliminary detection of such violent actions, but high irregularity of real sea states that strongly affect breaking, pose a challenge to their accurate prediction. In this frame is included the functional-technical adaptation of the Salerno port. In fact, the preliminary design phase outlined that both the laying depth and the structure geometry could

likely trigger violent impact loads on the structure, which occurrence could have threatened the effective implementation of the project. Then, an experimental campaign was needed to assess the magnitude of the possible impulsive loads, occurring at the front face of the structure. Physical tests detected, inter alia, violent impact loads on the caisson face, particularly on the REWEC3® cells, reaching local values 10 times greater than those given by literature formulations, so leading to a careful revision of the designed structure. In conclusion, main purpose of the present contribution is leading engineers and designers towards the accurate identification of impact loads on vertical structures, while emphasizing the significance of avoiding their potential underestimation. The case study of the Salerno port provided a relevant context for understanding this matter.

References

- [1] Oumeraci, H., 1994. Review and analysis of vertical breakwater failures - lesson learned. *Coastal Engineering*, 22.
- [2] Goda, Y., 1985. Random seas and maritime structures, *University of Tokyo Press*, Tokyo.
- [3] Takahashi, S., K. Tanimoto and K. Shimosako, 1994. Dynamic response and sliding of breakwater caissons against impulsive breaking wave forces. *Workshop on Wave Barriers in Deep Waters*, Port and Harbour Research Institute, Yokosuka.
- [4] Calabrese, M., and Vicinanza, D., 1999. Estimation of Proportion of Impacts. Final Proceedings EU MAST III, Proverbs-Project: Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters, Vol. IIA: Hydrodynamic Aspects, Chap. 2, Sec. 2.3, publ. University of Braunschweig, Germany.
- [5] Boccotti, P., 2012. Design of breakwater for conversion of wave energy into electrical energy. *Ocean Engineering*, 51, 106–118
- [6] Calabrese, M., Buccino, M. (2000). Wave impacts on vertical and composite breakwaters. Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), Seattle, USA.
- [7] Calabrese, M., and Vicinanza, D. (1999). Prediction of wave impact occurrence on vertical and composite breakwaters. EXCERPTA of the Italian Contributions to the Field of Hydraulic Engineering. Vol. 13, publ. GNI-Gruppo Nazionale Idraulica.
- [8] Oumeraci, H., Klammer, P. and Partenscky H.W., 1993. Classification of breaking wave loads on vertical structures. *Proc. ASCE, J. Waterw. Port Coastal Ocean Eng. Div.*, 119(4).
- [9] Oumeraci H., Kortenhaus A., Allsop N.W.H., de Groot M.B., Crouch R.S., Vrijling J.K., Voortman H.G. 2001. PROVERBS PRObabilistic design tools for VERTical BreakwaterS. 392 pp, Balkema, Rotterdam.
- [10a] Allsop, N.W.H., Vicinanza, D., M. Calabrese and L. Centurioni, 1996a. Breaking wave impact loads on vertical faces, *6th Int. Conf. ISOPE*, Los Angeles.
- [10b] Allsop, N.W.H., D. Vicinanza & J.E. McKenna, 1996b. Wave forces on vertical and composite breakwaters. *Strategic Research Report. Hydraulic Research Wallingford*, SR 443, Wallingford.
- [11] Ciccaglione M.C., Di Stefano M., Tassi T. S., Ramondini M., Calabrese M., 2023. Vibro-Replacement technique for the seabed of Salerno port. Proceedings of the Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days 25-27 October 2023.

Auteur principal : Rangognio – Franck – franck.rangognio@brl.fr – BRL ingénierie – 1105 av. Pierre Mendès-France 30001 Nîmes – France

Co-auteurs : Schalkwijk – Philippe – philippe.schalkwijk@brl.fr – BRL ingénierie – 1105 av. Pierre Mendès-France 30001 Nîmes – France

Mots clés/Key words : Ecluses, restauration, allongement, palplanches

Modernisation et restauration innovantes des écluses limitant les interruptions de navigation : exemple de Méricourt

Résumé : Le réseau navigable à grand gabarit français comporte de nombreuses écluses de conceptions, dimensions et d'âges différents. Aujourd'hui, une partie de ces ouvrages nécessite la réalisation de travaux importants de modernisation ou de restauration. Ces besoins résultent majoritairement soit de problèmes structurels historiques ou récents sur les ouvrages pouvant mettre en cause in fine leur pérennité ou leur disponibilité, soit d'une évolution du trafic actuel ou à venir en termes de fréquentation ou de dimensions de bateaux. Les travaux qui découlent de ces besoins consistent la plupart du temps en la reconstruction d'une partie des ouvrages, à la réalisation de nouvelles écluses en parallèle de celles existantes ou encore d'allongement des écluses existantes impliquant systématiquement des interventions lourdes à l'intérieur du chenal de navigation.

Les écluses concernées se situent généralement sur des axes de navigation très fréquentés pour lesquels des travaux longs dans le chenal de navigation impliquant un arrêt de service auraient des conséquences très importantes pour les usagers. Ainsi, le principal enjeu de ces opérations de modernisation ou de restauration réside dans le fait de pouvoir mettre en œuvre des solutions innovantes permettant de limiter au maximum l'impact sur la navigation et sur les arrêts de service des écluses.

Les écluses de Méricourt constituent un exemple de cet enjeu et des dispositions imaginées et mises en œuvre pour permettre la réalisation des travaux sans interruption de la navigation. Le site de Méricourt, situé sur la Seine dans le département des Yvelines, relie le port maritime du Havre à la ville de Paris, et représente 30% du trafic fluvial hexagonal en contribuant au passage de près de 250 navires par semaines via deux écluses à grand gabarit actuellement en service respectivement de 160 m et de 185 m de longueur. Les travaux réalisés sur ce site ont pour objectif non seulement de restaurer globalement les deux écluses dont les bajoyers et les terre-pleins ont subi au fil des années des déformations considérables tant en termes d'alignement que de verticalité remettant en question leur stabilité mais également d'allonger la seconde écluse afin de disposer de deux ouvrages de 185m de longueur utile. Afin de maintenir la navigation durant les travaux de reconstruction des bajoyers des deux ouvrages et

d'allongement de la seconde écluse, il a été nécessaire de faire appel à des solutions innovantes en termes de phasage de réalisation et de mise en œuvre d'aménagements provisoires.

Abstract : *The French wide-gauge navigable network includes a large number of locks of different designs, sizes and ages. Today, some of these locks require major modernisation or restoration work. These needs are mainly the result of historical or recent structural problems in the locks, which could ultimately jeopardise their durability or availability, or of current or future changes in traffic levels or boat sizes. The work required to meet these needs usually involves rebuilding part of the structures, building new locks alongside existing ones or extending existing locks, which systematically involves major work inside the navigation channel.*

The locks concerned are generally located on very busy shipping routes, where lengthy works in the navigation channel involving a stoppage of service would have very serious consequences for users. Therefore, the main challenge of these modernisation or restoration operations is to be able to implement innovative solutions that minimise the impact on navigation and lock service stoppages.

The locks at Méricourt are an example of this challenge and of the measures devised and implemented to enable the work to be carried out without interrupting navigation. The Méricourt site, located on the Seine in the department of Yvelines, links the seaport of Le Havre to the city of Paris, and accounts for 30% of France's river traffic, contributing to the passage of nearly 250 ships a week via two wide-gauge locks currently in service, 160 m and 185 m long respectively. The aim of the work being carried out on this site is not only to restore the two locks as a whole, the jambs of which have undergone considerable deformation over the years in terms of both alignment and verticality, calling into question their stability, but also to extend the second lock so as to have two structures with a usable length of 185m. In order to maintain navigation during the works to rebuild the abutments of the two structures and to lengthen the second lock, it was necessary to use innovative solutions in terms of the phasing of the works and the implementation of temporary facilities.

1. Introduction et enjeux

Le réseau navigable à grand gabarit en France représente environ 30% du réseau global. Sur ce linéaire certaines écluses présentent des désordres importants souvent issus de défauts de conception ou de construction. Les désordres les plus importants qui poursuivent leur évolution dans le temps peuvent conduire in fine à une rupture d'une partie de l'ouvrage. Il apparaît donc indispensable de pouvoir corriger les défauts initiaux et des restaurer ces désordres. En parallèle de la restauration des ouvrages, certains axes de navigation sont également concernés par des besoins d'évolution de trafic et des classes de bateaux qui doivent les emprunter. L'une des réponses partielles à ces évolutions consiste à accroître la longueur utile de certaines écluses existantes en construisant une nouvelle tête (aval ou amont) et en allongeant ainsi leur sas.

La restauration des dégradations les plus importantes ou l'allongement des sas des écluses constituent des travaux importants sur périodes de plusieurs mois – voire plusieurs années. Au regard du trafic fluvial actuel sur le réseau navigable à grand gabarit, aucune interruption de navigation longue ne peut être envisagée au niveau des écluses. Le principal enjeu consiste donc à imaginer des solutions innovantes permettant la réalisation de ces travaux tout en limitant au maximum leur impact sur la navigation et sur les arrêts de service des écluses. Ces solutions impliquent l'utilisation de techniques particulières conjuguées à des phasages de réalisation très fins élaborés autour de quelques périodes de chômages les plus courtes possibles (*généralement de l'ordre quelques semaines*). Le second enjeu de ces travaux lourds, réalisés directement sur des ouvrages maintenus en service, consiste à garantir la pérennité des infrastructures de génie civil existantes et des équipements en fonctionnement durant toutes les phases de construction. Cette contrainte ajoute une complexité supplémentaire dans les phasages à imaginer et sur la conception d'aménagements provisoires pour assurer et contrôler la stabilité des parties d'ouvrages existantes.

L'ensemble de ces enjeux se retrouvent sur le projet de restauration et d'allongement des écluses de Méricourt. Le site de Méricourt, localisé sur la Seine, est constitué de deux écluses à grand gabarit respectivement de 160m et 185m de longueurs utiles, structurellement dépendantes l'un de l'autre, qui présentent des pathologies historiques remettant en cause leur pérennité. Au-delà de la stabilité des ouvrages, l'axe sur lequel se situent les écluses est non seulement très fréquenté, interdisant toute interruption de navigation, mais est également amené à évoluer en termes de fréquentation et de gabarit de bateaux, impliquant la nécessité d'allonger la seconde écluse afin de disposer de deux ouvrages de 185m de longueur.

2. Présentation des ouvrages de Méricourt

Les écluses de Méricourt sont situées sur la Seine, dans le département des Yvelines, à une soixantaine de kilomètres à l'aval de Paris. Le bief de Méricourt est long de 48 km environ et les ouvrages se situent en aval des ouvrages d'Andrésy et en amont des ouvrages de Notre-Dame-de-la-Garenne.

Les écluses de Méricourt fonctionnent 24/24 heures et 360 jours par an. Elles constituent un enjeu important pour le trafic fluvial car elles permettent le franchissement de la moitié du trafic circulant sur la Seine, soit 250 bateaux chaque semaine.



Figure 1 – Localisation des écluses (source VNF)

Le site de Méricourt comprend depuis la rive gauche vers la rive droite :

- Une écluse désaffectée de gabarit 140 m x 12 m construite en 1878 en maçonnerie, actuellement batardée et tenant le niveau du bief amont,
- Un terre-plein coté berge (TPB),

- 1 écluse de gabarit 160 m x 17 m x 5 m construite dans les années 1960, équipée de deux portes busquées (*écluse n°1*),
- Un terre-plein central (TPC) accueillant le local de commande des deux écluses en service et du barrage,
- Une écluse de gabarit 185 m x 12 m x 4,5 m également construite dans les années 1960, constituée à l'origine d'un sas de 160 m équipé de deux portes busquées, dont la longueur a été portée à 185 m au début des années 70 par l'installation d'une porte levante à l'aval (*écluse n°2*),
- Un terre-plein coté Seine (TPS),
- Un barrage de régulation reconstruit en 1960, composé de 5 passes dont 2 navigables en crue,
- Une centrale hydroélectrique équipée d'une passe à poissons.

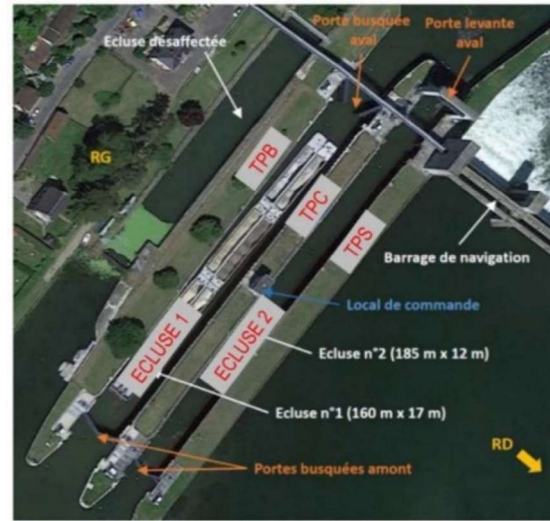


Figure 2 – Vue en plan des écluses (source : Google Earth)

Les têtes amont et aval des deux écluses sont en béton armé. Les sas, quant-à-eux, sont constitués de bajoyers en rideaux de palplanches tirantés les uns aux autres, de radiers en colcrete (gros béton) sur 1m d'épaisseur servant de butons aux rideaux de palplanches et de terre-pleins remblayés avec les matériaux du site lors de la construction des ouvrages (*sables à passages limoneux à argileux*) surplombant le substratum composé de craie plus ou moins altérée.

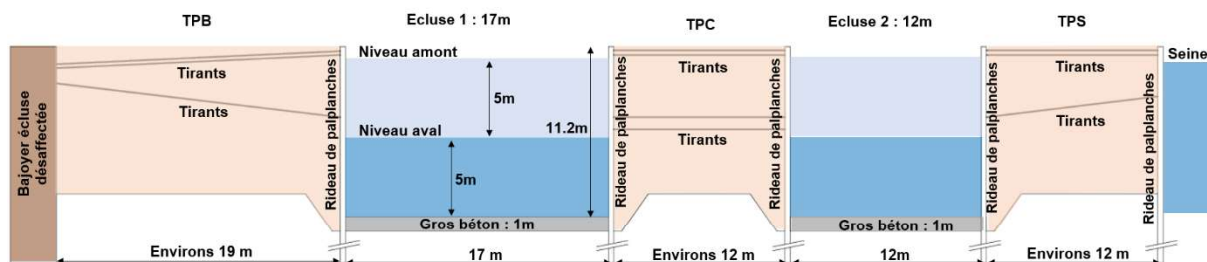


Figure 3 – Profil en travers au niveau des sas de l'ensemble des écluses (source : BRL)

Cette conception économique génère plusieurs contraintes : d'une part les sas des écluses ne sont pas vidangeables (seules les têtes amont et aval de l'écluse non allongée peuvent être batardées et mises à sec), d'autre part chacun des trois ensembles composés par les *bajoyers en palplanches tirantés entre eux* + *les remblais des terre-pleins* constituent des massifs poids « *semi-souples* » autostables dont la stabilité et les déformations impactent directement le bon fonctionnement des ouvrages adjacents (*écluse désaffectée tenant le bief amont, écluse n°1, écluse n°2, niveau de la Seine*).

3. Présentation des problématiques

Les écluses de Méricourt présentent plusieurs problématiques. La principale problématique concerne les dégradations structurelles des bajoyers des deux écluses qui remettent en cause, à terme, leur stabilité,

et qui présentent des déformations importantes impactant directement le gabarit des bateaux pouvant emprunter ces ouvrages. La seconde problématique est directement liée à la configuration des écluses elles-mêmes : le site est composé d'une première écluse de 17m de largeur et de seulement 160m de longueur et d'une seconde écluse de seulement 12m de largeur ayant déjà fait l'objet de travaux d'allongement à 185m via la mise en place d'une porte levante aval. Cette configuration n'apparaît pas satisfaisante car elle limite d'une part les bateaux et les convois de plus de 12m de largeur à une longueur maximale de 160m et elle contraint d'autre part les bateaux et les convois de plus de 185m de longueur à emprunter obligatoirement l'écluse actuellement allongée malgré sa largeur théorique de 12m fortement réduite, du fait de la déformation structurelle de ses bajoyers, et des dysfonctionnements de sa porte levante aval lors de sa manœuvre engendrant des blocages réguliers de cette dernière.

Les travaux prévus visent à répondre à ces deux problématiques en restaurant totalement le génie civil des bajoyers de manière à permettre aux écluses de retrouver leur pérennité structurelle et leur largeurs théoriques initiales, en restaurant et fiabilisant les équipements et notamment les portes amont et aval des deux écluses, et enfin en uniformisant les longueurs des deux sas à 185m afin de permettre aux bateaux et convois d'emprunter sans contrainte l'une ou l'autre écluse.

3.1 Réponse à la première problématique : pérenniser le génie civil et redonner aux sas leur largeurs initiales

Depuis leur construction, plusieurs désordres sont apparus sur les écluses : apparition de fontis au niveau des terre-pleins, déformations d'ensemble des bajoyers. Ces désordres impactent non seulement le gabarit des sas des écluses (*les déformations sont si importantes qu'elles affectent la capacité des bateaux les plus importants à entrer dans les sas*) mais également la pérennité des ouvrages car le phénomène est évolutif et s'auto-alimente jusqu'à aboutir in fine à la rupture des bajoyers.

Plusieurs phénomènes en interaction les uns avec les autres sont observables : les faits générateurs semblent être à la fois un mauvais compactage des remblais constituant les terre-pleins et une mauvaise mise en œuvre du gros béton constituant les radiers des sas contre les rideaux de palplanches

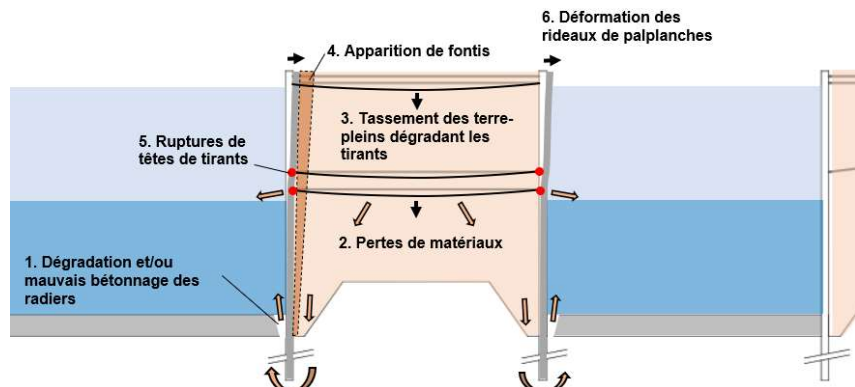


Figure 4 – Cycle de dégradation du génie civil des écluses (source : BRL)

constituant les bajoyers. Le mauvais compactage des remblais à l'intérieur des terre-pleins a conduit assez rapidement à l'apparition de tassements dans ces derniers. Ces tassements ont généré des déformations des tirants qui ont conduit à la rupture de certains d'entre eux, notamment au niveau de leurs têtes. Ce cycle de rupture progressive des tirants est voué à terme à se propager à l'ensemble de l'ouvrage.



Figure 5 – Déformation du bajoyer gauche de l'écluse n°2 (source : BRL)

en particulier l'écluse n°2 qui n'a que 12 mètres de largeur.

La mauvaise mise en œuvre du gros béton constituant les radiers des sas au contact des rideaux de palplanches a généré simultanément des défauts de butée du pied de ces derniers et, à chaque sassée descendante, des pertes de matériaux fins depuis les terre-pleins à travers la craie altérée de fondations. Ces pertes de matériaux ont généré l'apparition de vides à l'arrière des bajoyers sur toute leur hauteur et l'apparition de fontis. Le cumul des défauts de butée de pied et la présence de vides à l'arrière des bajoyers conduit à des déformations verticales et longitudinales très importantes des bajoyers impactant le gabarit des bateaux pouvant emprunter les écluses,

La réponse à la première problématique doit donc comprendre une restauration complète de la structure des bajoyers et de leurs tirants, une remise au gabarit de la largeur des deux sas et un étanchement complet des terre-pleins vis-à-vis du risque de transport de matériaux fins.

3.2 Réponse à la seconde problématique : fiabiliser la disponibilité d'une écluse pour les bateaux de gabarit Vb (185m)

Afin de garantir le passage des bateaux de gabarit Vb (*longueur allant jusqu'à 185m*), il convient tout d'abord de diagnostiquer et de restaurer les équipements des têtes des écluses : contrôle-commande, réseaux, vantaux et organes de manœuvre des deux portes busquées amont, tablier et organes de manœuvre de la porte levante, vannes de régulation des aqueducs de contournement des têtes équipées de portes busquées, vantelles de la porte levante, etc. Cette étape de diagnostic et de restauration des équipements permet d'améliorer leur fiabilité, en particulier concernant la porte levante équipant la seule écluse de 185m qui présente historiquement des dysfonctionnements importants, notamment au niveau de ses chaînes de manœuvre, de ses guidages. La seconde partie de la réponse à la problématique de disponibilité d'une écluse de gabarit Vb consiste allonger l'écluse n°1 de 25m afin de porter la longueur utile de son sas à 185m. Pour cela une nouvelle tête aval doit être construite en aval de la tête actuelle.

La porte busquée de la tête aval existante, en mauvais état, doit alors être démontée et évacuée.



Figure 6 – Porte levante aval de l'écluse n°2 (source : BRL)

4. Présentation des solutions apportées pour répondre aux différents enjeux

Dans le cadre des réponses apportées aux deux problématiques présentées, il convient de ne pas oublier les deux principaux enjeux majeurs identifiés :

- Les travaux doivent être réalisés en limitant au maximum leur impact sur la navigation et sur les arrêts de service des écluses. Pour le cas spécifique de Méricourt, le fait de disposer de deux écluses en parallèle a conduit à n'autoriser aucune interruption de navigation. Ainsi, l'exigence a consisté à

disposer durant toute la durée du chantier d'au moins une écluse de 185m de longueur.

- Les travaux doivent être réalisés en garantissant durant toute la durée du chantier la pérennité des infrastructures de génie civil existantes et des équipements en fonctionnement.

La réponse aux deux problématiques tout en tenant compte des deux enjeux majeurs a consisté à imaginer un phasage particulier de travaux s'appuyant sur des aménagements provisoires spécifiques.

2.1.2 Présentation synthétique de la configuration des ouvrages définitifs

Les têtes amont des deux écluses et la tête aval de l'écluse n°2, en béton armé, sont intégralement conservées. Les quelques désordres du génie civil, principalement des épaufrures, sont corrigés et les équipements sont entièrement restaurés : évacuations de l'ensemble des structures de portes en atelier, y compris la porte levante et son tablier de protection, pour remise en peinture et remplacement des pièces d'usure (*joints, galets, articulations, etc.*), remplacement des vérins de manœuvre et des centrales à huile des portes busquées, remplacement des chaînes de manœuvre de la porte levante, remplacement complet des réseaux, modernisation des équipements de contrôle-commande, etc.



Figure 8 – Nouvelle tête aval de l'écluse n°1 après allongement (source : BRL)

Les nouveaux ouvrages contre les chocs accidentels de bateaux.

La structure des bajoyers et des terre-pleins des sas restaurés est de conception globalement similaire à celle des anciennes écluses moyennant la correction des malfaçons historiques. Les travaux ont consisté, pour chacun des terre-pleins, à décaisser dans un premier temps les remblais (*repères 1 sur la figure 9*) sur une profondeur d'un peu moins de 5m pour permettre un accès aux tirants existants afin de les couper et les retirer. Suite au retrait des tirants existants, les nouveaux rideaux de palplanches (*repères 2 sur la figure 9*) ont pu être battus à l'arrière des rideaux existants. De nouveaux tirants (*repères 3 sur la figure*

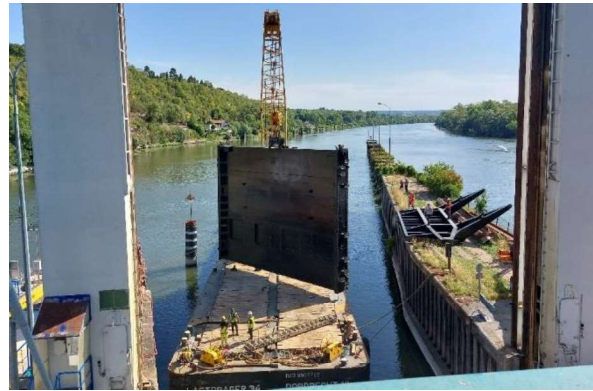


Figure 7 – Remise en place de la porte levante aval de l'écluse n°2 (source : BRL)

La nouvelle tête aval de l'écluse n°1 allongée est également composée d'une structure en béton armé équipée de portes busquées accueillant des vannes. Cette nouvelle structure, entièrement batardable et vidangeable, est directement accolée à la structure de l'ancienne tête aval (*visible au niveau du tiers inférieur de la figure 8*) qui est réaménagée en portion de sas (mise en place d'échelles et de bollards flottants dans les chambres des anciennes portes busquées). La nouvelle tête aval étant implantée en parallèle de l'ancien musoir aval séparant les deux écluses, un ouvrage de guidage aval, constitué de pieux battus, d'une dalle diaphragme en béton armé et de 5 niveaux de lisses de guidage a été réalisée afin de protéger les

9) ont ensuite été mis en place par forage (pour le TPB) ou par simple pose (pour le TPC et le TPS). Le recépage sous eau des anciens rideaux de palplanches (*repères 4 sur la figure 9*) a ensuite permis de reconstituer les butées de pieds des palplanches (*repères 5 sur la figure 9*) par mise en œuvre de béton (*deux techniques ont été testées selon les bajoyers concernés : 1- déstructuration du sol en place par hydroblast, suivi d'une purge et d'un remplissage en béton ; 2- traitement de sol en jet grouting*). Après reconstitution des butées de pieds, les terre-pleins ont pu être remblayés à leur cote d'origine avec les matériaux préalablement retirés et stockés (*repères 1 sur la figure 9*) complété par des matériaux d'apport. La mise en œuvre des équipements des bajoyers (*lisses de guidage horizontales et verticales, bollards flottants, bollards fixes, échelles, etc. - repères 6 sur la figure 9*) a constitué la finalisation des principaux travaux sur les terre-pleins.

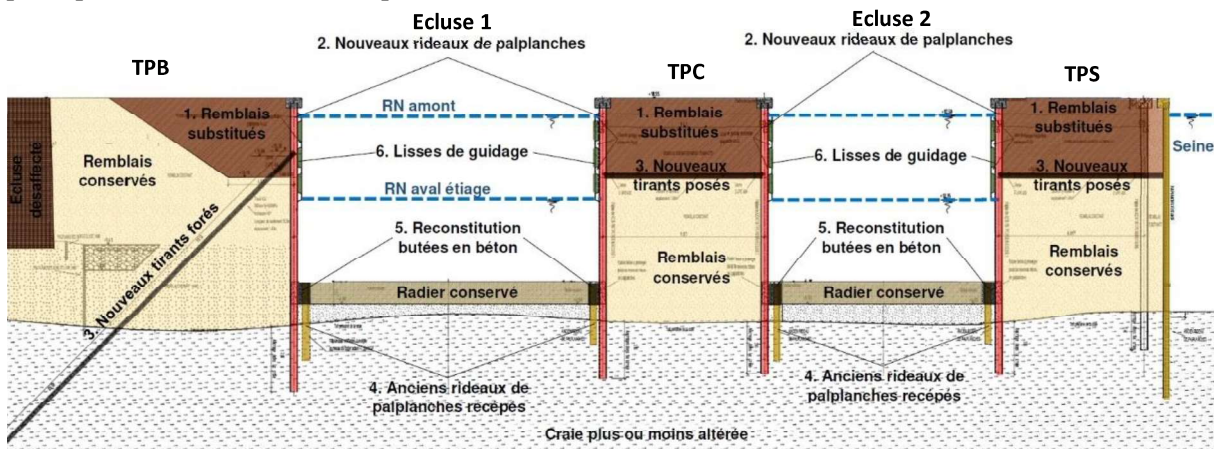


Figure 9 – Profil en travers des sas après travaux (source : BRL)

2.1.3 Présentation du phasage global de réalisation

Le chantier global d'environ 4 ans se décompose en quatre phases principales s'articulant autour de chômages alternatifs des deux écluses. La première phase a simplement consisté à fiabiliser (*sans pour autant la restaurer*) la porte levante aval de l'écluse 2 afin d'en garantir le bon fonctionnement durant toute la période de chômage, et donc d'indisponibilité, de l'écluse 1. Une fois la porte levante fiabilisée, la phase 2 a consisté à mener simultanément d'une part les travaux de restauration du TPB et du bajoyer gauche de l'écluse 1 et d'autre part les travaux de construction de la nouvelle tête aval

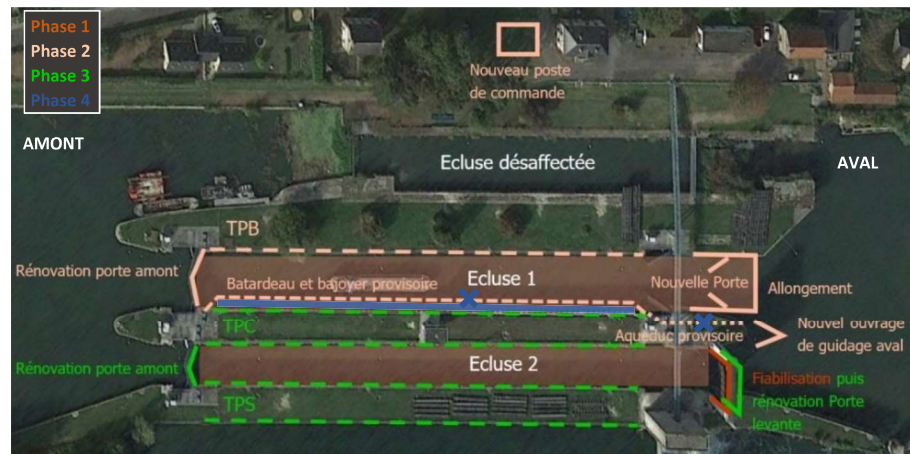


Figure 10 – Découpage en plan des 4 principales phases (source : BRL)

permettant un allongement de l'écluse à 185m. Cette seconde phase a également permis de réaliser la restauration de la porte amont, la construction d'un nouvel ouvrage de guidage et de protection aval des deux écluses, la construction d'un nouveau poste de commande afin de permettre la déconstruction de l'ancien poste situé sur le TPC et enfin l'installation d'un bajoyer-batardeau provisoire sur l'ensemble du linéaire du sas de l'écluse ayant pour rôle d'assurer la fonction de bajoyer droit provisoire lors de sa remise en service et durant toute la phase 3.

Après remise en service de l'écluse 1 allongée, la phase 3 a ainsi pu débuter à l'abri d'un batardeau de chantier constitué par ce bajoyer provisoire et a consisté à restaurer les terre-pleins TPC et TPS, le bajoyer droit de l'écluse 1 et l'ensemble de l'écluse 2 (porte amont, porte aval et ses deux bajoyers). Enfin, l'ultime étape correspond à un retour des travaux sur l'écluse 1 afin de lui permettre de retrouver son gabarit de 17m de largeur via le démontage du bajoyer-batardeau provisoire et l'aménagement de son bajoyer droit avec ses équipements de navigation.

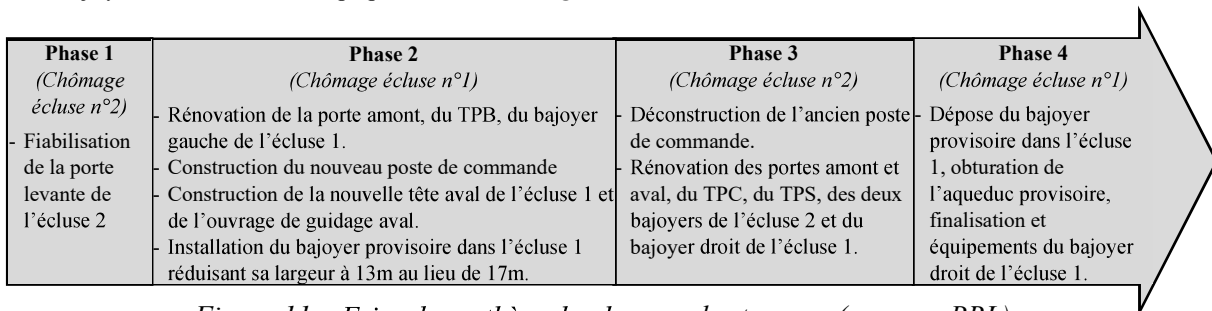


Figure 11 – Frise de synthèse du phasage des travaux (source : BRL)

2.1.4 Présentation des aménagements spécifiques réalisés

La faisabilité du phasage global présenté précédemment repose directement sur la réalisation d'aménagements provisoires permettant de maintenir systématiquement l'une des deux écluses en service tout en garantissant la mise en sécurité à la fois des bateliers et des intervenants du chantier.

Le batardeau-bajoyer provisoire constitue la clef de voute de l'opération, il s'agit d'un ouvrage constitué de 43 pieux HEM700 fichés dans la craie au marteau hydraulique après carottage du radier, 170ml de palplanches GU8N enclenchées entre les pieux et 4 niveaux de lisses de guidage de 170m chacune. L'ensemble s'appuie sur la partie médiane de l'ancien rideau de palplanches du TPC via un ensemble de boutons. La zone située entre le batardeau-bajoyer provisoire et le TPC est partiellement remblayé par un matériau drainant qui a pour fonction de buter le pied du batardeau durant les sasses hautes de l'écluse 1 et de drainer vers le bief aval l'ensemble des fuites pouvant apparaître à travers et sous le batardeau. Cet ouvrage, qui permet

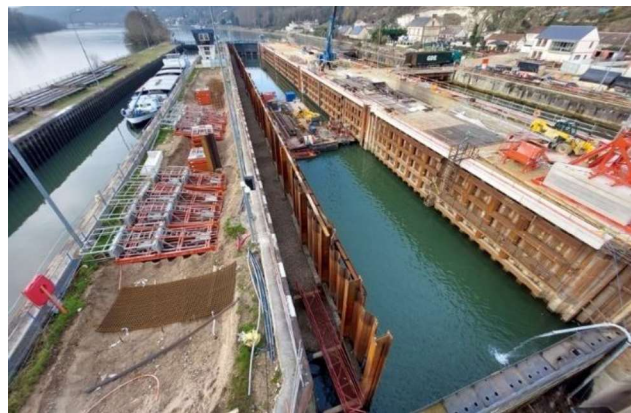


Figure 12 – Photo du batardeau-bajoyer provisoire (source : BRL)

le fonctionnement de l'écluse 1 réduite à une largeur de 13m, est dimensionné pour reprendre jusqu'à 5m de différence de niveau d'eau entre le sas et la tranchée drainante ainsi que les chocs des bateaux contre les 4 niveaux de lisses de guidage installés.

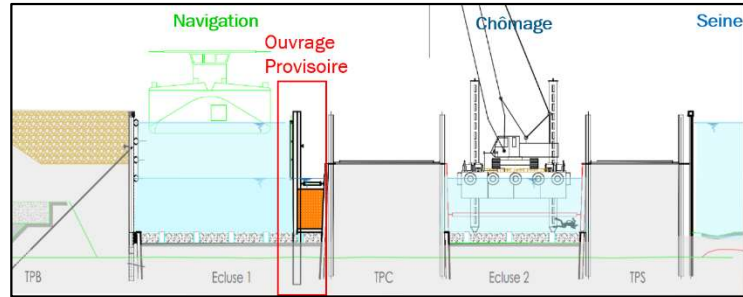


Figure 13 – Profil des écluses lors de la phase 3 (source : BRL)

La tranchée drainante aménagée entre le batardeau-bajoyer provisoire et le TPC doit être raccordée au bief aval afin de permettre une évacuation gravitaire des fuites collectées à travers et sous ce batardeau. Afin de permettre ce raccordement hydraulique, le choix a été fait d'utiliser une partie de l'aqueduc de vidange coté droit de l'ancienne tête de l'écluse sur lequel se referme le batardeau-bajoyer provisoire. Cet aqueduc désaffecté a été adapté via la mise en place d'une obturation en béton de son ancien exutoire aval et le percement d'une section de passage carrée de 2m de côté assurant sa connexion avec un dalot provisoire installé à l'arrière du bajoyer droit de la nouvelle tête aval durant sa construction.

Le dalot provisoire à l'arrière du bajoyer de la tête aval sera finalement comblé lors de la phase quatre.

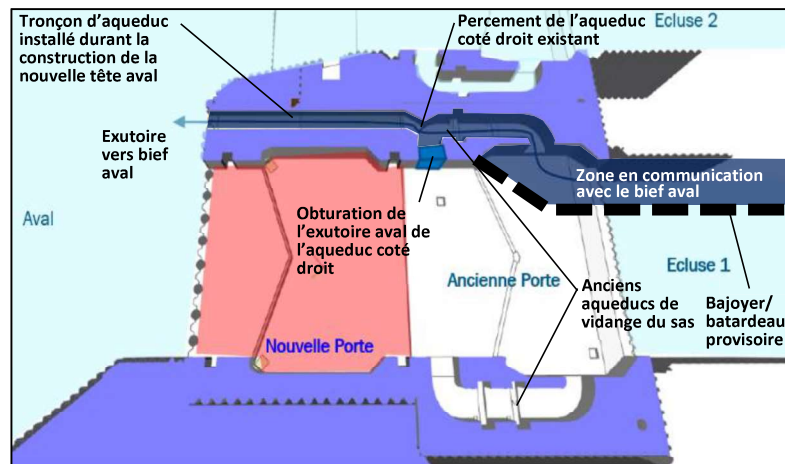


Figure 14 – Schéma d'évacuation des eaux de drainage vers le bief aval durant la phase 3 (source : BRL)

5. Conclusion et perspectives

Les travaux de restauration et/ou d'allongement des écluses à grand gabarit constituent souvent des besoins impératifs qui se confrontent aux enjeux de disponibilité des ouvrages et d'absence d'interruption de la navigation.

L'exemple des travaux de Méricourt, mais également d'autres exemples de travaux passés ou à venir d'allongement (*écluses de Quesnoy-sur-Deûle, de Rochetaillée, de Bollène, de Châteauneuf*) ou de restauration (*écluse de Denain*) montrent qu'il est tout-à-fait possible de concilier des travaux lourds avec des durées limitées des chômages des écluses.

Néanmoins, pour cela, les Maîtres d'œuvres et les entreprises en charge des travaux doivent faire preuve d'innovation lors des études des phasages de réalisation en ayant recours si nécessaire à des ouvrages provisoires ambitieux.

Auteur principal : MASSY – Pierre-Yves – pierre-yves.massy@brl.fr – BRLingénierie – 1105 avenue Pierre Mendès-France 30 000 Nîmes - France

Co-auteurs : DERYCKERE – Nicolas – nicolas.deryckere@ghdr.fr – Ghent Dredging – Steenweg 250, 9810 Nazareth - Belgique

Mots clés/Key words : Dragage; Remblais hydraulique; Diffuseur; Amélioration de sol; Travaux maritimes, Grand Port Maritime de Dunkerque.

Les avantages de l'utilisation de diffuseurs dans les travaux de remblais hydrauliques au port de Dunkerque

Résumé: Cet article présente une étude détaillée sur l'utilisation de diffuseurs dans le cadre des travaux de comblement partiel d'une darse maritime d'environ 9 000 m² située dans le port à flot de Dunkerque entre le Quai de Grande-Synthe (QGS) et l'appontement Multivrac Nord (QP2). Les travaux de création de terre-pleins, par remblais hydrauliques, jouent un rôle vital dans le développement des ports en recherche d'augmentation de leur surface foncière sur l'emprise maritime. Cette étude met en lumière l'efficacité de l'utilisation de diffuseurs pour améliorer ces travaux de remblaiement sous l'eau.

Les diffuseurs sont des dispositifs spécialement conçus en sortie de colonne de refoulement hydraulique pour distribuer de manière homogène, les matériaux de dragage directement à proximité du fond, contribuant ainsi à augmenter la stabilité des remblais. En particulier, cette méthode permet d'augmenter la compacité des sables par rapport à une méthode classique de refoulement au ras de l'eau, réduisant ainsi les risques de tassement futur de l'ouvrage.

L'article met en avant les avantages clés de l'utilisation de diffuseurs dans ce projet spécifique au port de Dunkerque. Il met en évidence l'importance de cette technique innovante dans l'amélioration de la stabilité des remblais hydrauliques pour le développement des infrastructures portuaires.

Abstract : This article presents a detailed study on the use of diffusers in the context of partial infilling works in a maritime basin of approximately 9,000 square meters located at the Port of Dunkirk, between the Quai de Grande-Synthe (QGS) and the Multibulk North wharf (QP2). Hydraulic fill works play a vital role in the development of port infrastructure seeking land within navigable areas, and this study sheds light on the effectiveness of diffuser use in enhancing underwater construction activities.

Diffusers are specialized devices located at the outlet of hydraulic discharge columns, designed to evenly distribute dredging materials directly near the seabed, thereby contributing to the increased stability of the fills. In particular, this method enhances the compaction of sands

compared to a traditional method of discharge at the water's surface, thus reducing the risk of future settling of the structure.

The article highlights the key advantages of employing diffusers in this specific project at the Port of Dunkirk, underscoring the significance of this innovative technique in improving the stability of hydraulic fills for the development of port infrastructure.

1. Introduction

Le Grand Port Maritime de Dunkerque (GPMD), l'un des piliers économiques de la Région Hauts de France, a entrepris depuis de nombreuses années des projets de grande envergure pour renforcer sa capacité de stockage et d'accueil tout en répondant aux exigences spécifiques de ses activités maritimes. Parmi ces projets réside le comblement partiel d'une darse (*Figure 1*), délimitée au nord par l'appontement Multivrac (QP2) et au sud par le quai de Grande-Synthe (QGS). Cette zone revêt une importance capitale en tant que point central du trafic de céréales géré par la Société d'Intérêt Collectif Agricole (SICA) Nord Céréales, atteignant en moyenne 3 millions de tonnes par an.



Figure 1 : Plan de situation du projet

Le projet vise principalement à créer une surface de 120 mètres de long sur 75 mètres de large, destinée à accueillir deux nouveaux silos de stockage d'une capacité totale de 86 000 tonnes (*Figure 2*). Cet agrandissement est essentiel pour répondre aux besoins croissants de stockage de Nord Céréales.

Ce projet requiert une compacité finale des remblais à un niveau optimal ($q_c > 12 \text{ MPa}$), un impératif incontournable pour garantir la stabilité et la longévité des futures infrastructures. Par ailleurs, le remblai doit être protégé contre l'érosion générée par les jets d'hélices des barges qui auront la possibilité d'accoster et de s'amarrer sur la face Sud de l'appontement existant (QP2) et sur le quai de Grande-Synthe (QGS).

De plus, le projet impose une surveillance continue et automatisée des ouvrages. Cette surveillance doit être en place non seulement pendant la phase active de construction, mais aussi au cours de la période

suivant l'achèvement du projet. Cette vigilance concerne à la fois le déplacement horizontal et vertical des caissons en béton du QP2 mais également les sujets de vibrations générées par les travaux sur les équipements industriels en exploitation (Pont roulant, bandes transporteuses, ...). Elle est donc nécessaire pour garantir la sécurité des opérations portuaires et pour prévenir tout risque potentiel lié à la réalisation d'un remblai de grande hauteur à proximité des fondations du QP2.

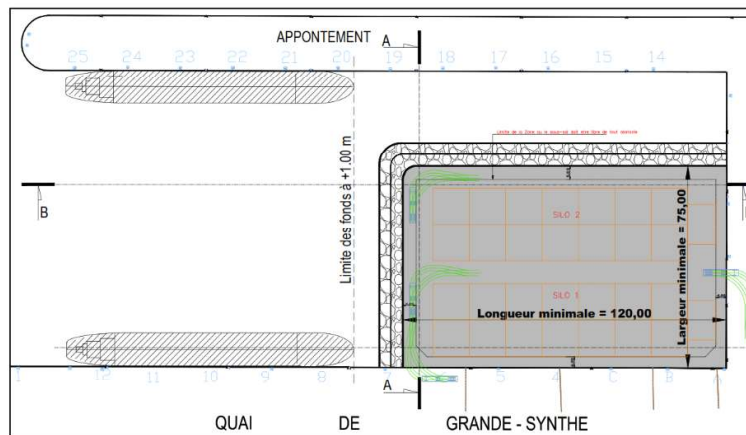


Figure 2 : Vue en plan du projet

Ce projet, attribué au groupement Ghent Dredging (entreprise) - BRL ingénierie (MOE intégrée) en avril 2021, témoigne de manière indéniable de l'engagement résolu du Grand Port Maritime de Dunkerque en faveur du développement économique et de l'adaptation de ses infrastructures portuaires. Cet engagement est essentiel pour soutenir la croissance économique dynamique de la région et maintenir la compétitivité du port à l'échelle nationale et internationale.

2. Géométrie du remblai à réaliser

Pour mieux appréhender le projet de comblement partiel de la darse au Port de Dunkerque, il est essentiel de comprendre les dimensions de la surface exploitée ainsi que les caractéristiques géométriques spécifiques du remblai. Ces paramètres définissent la structure du projet et influencent sa stabilité tant pendant la phase de construction que dans sa configuration finale.

Les principales caractéristiques géométriques du remblai sont :

- Surface d'exploitation : 75m par 120m.
- Niveau de la plateforme : +8.50m CM.
- Niveau de la crête de talus : +9.00m CM.
- Niveau maximal du fond sableux après curage : -9.00m CM.
- Pente du talus : Le talus est conçu avec une pente de 28 degrés. Cela représente la pente la plus raide admissible tout en préservant la stabilité du remblai au glissement, tant pendant les travaux que dans la configuration finale.

- Niveau de l'eau dans la darse : Le niveau de l'eau dans la darse varie entre +5.50m CM et +6.20m CM. Il est important de noter que ces variations ne sont pas dues aux marées, car le projet se situe dans le port à flot de Dunkerque, accessible depuis la mer du Nord via des écluses maintenant un niveau d'eau constant.

Le choix d'une pente de talus de 28 degrés est le résultat d'études approfondies de conception visant à concilier la stabilité du talus tout au long des travaux et dans leur configuration finale, tout en tenant compte des caractéristiques des matériaux disponibles. Cette pente permet également de minimiser l'impact du remblai sur la stabilité du quai en caisson béton du QP2.

Le remblai se compose d'une digue d'enclosure délimitant la plateforme d'exploitation. L'enceinte créée par la digue est comblée par un remblai hydraulique vibrocompacté. En partant du terreplein vers l'extérieur du talus, la digue se compose successivement d'un remblai vibrocompacté sous l'eau, surmonté d'une couche de laitiers protégée par une couche d'enrochements de calibre 1/500 kg. Pour garantir des conditions optimales de filtration et de retenue des laitiers à travers les enrochements, un géotextile a été placé, sous eau, à l'interface de ces deux couches. La figure suivante présente une coupe type du projet (Figure 3).

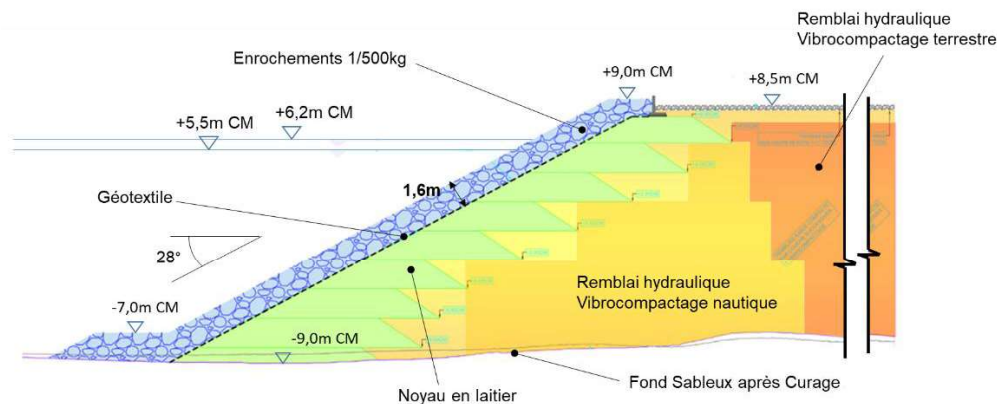


Figure 3 : Coupe type du remblai

3. Nature du remblai utilisé

3.1 Propriétés physiques

Le sable marin utilisé pour le remblai provient de la Rade Jean Bart située à l'entrée du port de Dunkerque où il a été prélevé par dragage. Il s'agit d'un sable de type D1 selon la classification GTR. Il présente une granularité serrée avec une distribution des grains relativement uniforme ($1.6 \leq C_u = d_{60}/d_{10} \leq 2.5$). Ces sables contiennent une faible proportion de fines inférieure à 5 %.

De nombreux essais ont été réalisés au cours du chantier et les principales caractéristiques physiques de ce matériau sont :

- $d_{50}=0.3\text{mm}$

- Indice des vides foisonné : 0.94- 1.07
- Indice des vides compacté : 0.66 – 0.79
- Teneur en $\text{CaCO}_3=9\text{-}18\%$

La figure suivante présente la courbe granulométrique caractéristique du sable prélevé dans la rade Jean Bart.

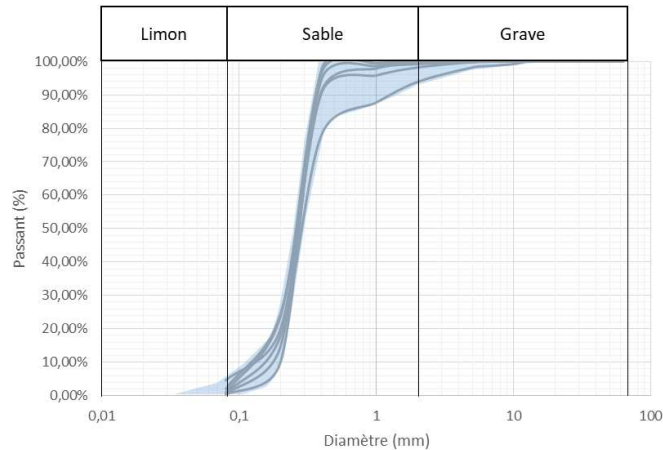


Figure 4 : Courbe granulométrique.

3.2 Propriétés mécaniques

Il a été tenté de déterminer les propriétés mécaniques du sable par des essais de cisaillement à la boîte de Casagrande à une vitesse lente de 0.01mm/min. Deux essais ont été exécutés sur des échantillons remaniés avec des indices de vides qui correspondent à un sable lâche. Cependant, les résultats obtenus ($c'=12\text{-}15$ kPa, $\phi'=33 - 38^\circ$) ont été considérés non concluants car ils ne correspondent pas aux caractéristiques classiques d'un sable lâche. Il a donc été préféré de retenir des paramètres mécaniques sécuritaires en correspondance avec nos objectifs de résistance de pointe q_c .

Matériaux	q_c (MPa)	c' (kPa)	ϕ' ($^\circ$)
Sable avant vibrocompactage	4	0	29
Sable après vibrocompactage	12	0	35

Tableau 1 – Paramètres du modèle géotechnique retenus pour les sables des remblais hydrauliques

4. Méthode de mise en œuvre du remblai hydraulique

Le processus de mise en œuvre du remblai hydraulique entre -9.0m CM et +4.0m CM se déroule de manière progressive, suivant une méthodologie spécifique. Le noyau de la digue en laitier de Haut Fourneau 0/100mm est construit par couches de 2 mètres de hauteur, en utilisant une pelle hydraulique montée sur un ponton pour former des merlons trapézoïdaux avec une pente de 28° . Au lieu d'être déversés au-dessus de l'eau, les matériaux sont transportés sous l'eau dans le godet de la pelle

hydraulique, puis déposés sur le fond à une hauteur spécifique au-dessus de la structure en cours de construction (*Figure 5*).

Après la formation du merlon trapézoïdal en laitier HF, un épaulement en sable marin est créé derrière le noyau sur une largeur de 5 mètres en tête, derrière le pied du prochain merlon de rang (n+1).

Lorsque les niveaux de remblai atteignent respectivement -4.0m CM, +0.0m CM, +2.0m CM et +4.0m CM, un processus de vibrocompactage est entrepris sous l'eau pour améliorer les propriétés mécaniques du remblai hydraulique près du noyau en laitier, garantissant ainsi la stabilité contre un grand glissement du talus.

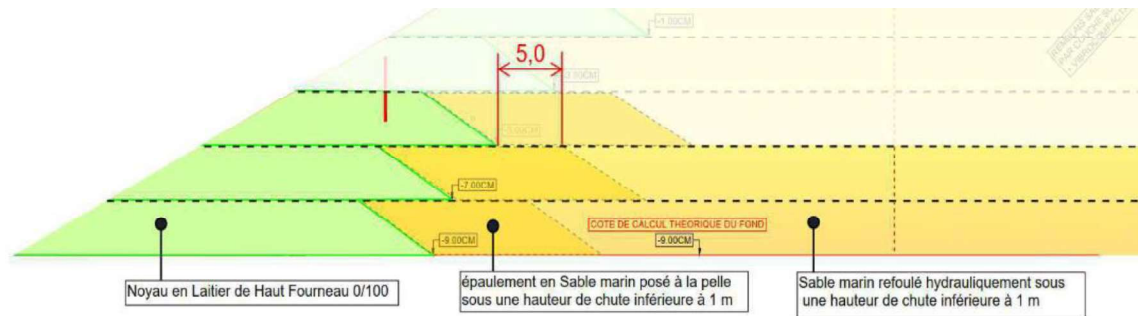


Figure 5 : Principe de montée du remblai.

Pour approvisionner le sable marin nécessaire au remblaiement de la darse, une drague aspiratrice en marche (DAM) est utilisée, et le sable est déchargé à sec dans quatre barges de 600 m³ à l'aide d'une bande transporteuse. Les quatre barges servent ensuite de "bacs tampons" pour alimenter en continu la suceuse-refouleuse en sable, amarrée au quai de Grande-Synthe (QGS).

La suceuse-refouleuse (*Figure 7*) utilise une buse reliée à une pompe pour injecter de l'eau dans le sable, créant un mélange [eau+sable] qui est aspiré puis pompé dans un réseau de refoulement composé de conduites métalliques le long du quai, puis de conduites flexibles flottantes reliées au diffuseur.



Figure 6 : Mise en œuvre par diffuseur en dessous du niveau de l'eau (A gauche, le bras du diffuseur est sous l'eau, à droite il est au-dessus de l'eau).

Le diffuseur (*Figure 6*), équipé d'une élinde réglable en hauteur, est déplacé en utilisant des winchs et des câbles métalliques fixés aux quais entourant la darse. Il est positionné en coordination avec le DIPPER, chargé du montage du noyau, pour remblayer le fond de la darse par paliers de 2.0 mètres, s'arrêtant contre l'épaulement sableux situé sur la face interne des merlons en laitier HF.



Figure 7 : Suceuse-refouleuse et barge de remblai à gauche et écran de commande du diffuseur à droite.

Lorsque le mouillage dans la darse devient insuffisant par rapport au tirant d'eau du pousseur, le diffuseur est démonté, et le refoulement s'effectue uniquement à l'aide des conduites rigides.

5. Intérêt d'une mise en œuvre par diffuseur

L'utilisation de diffuseurs dans les travaux de remblais hydrauliques offre des avantages significatifs, notamment une amélioration marquée de la compacité des matériaux déposés à proximité du fond ($\leq 0.5\text{m}$). Cette augmentation de la densité relative des sables se traduit par une nette amélioration des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés, ce qui, à son tour, optimise la stabilité des talus et limite les tassements par rapport à la méthode de refoulement classique depuis la surface.

Dans le cadre de cet article, nous avons réalisé une comparaison entre le remblaiement par diffuseur réalisé sur le projet de Dunkerque et le refoulement en surface qui a été mis en œuvre sur le Quai H à Sète (MOE BRLi). Les résultats ont montré une nette distinction en termes de compacité, avec un q_c moyen de 8 MPa pour la méthode utilisant le diffuseur, par rapport à seulement 2 MPa pour le refoulement en surface. Cette différence notable se traduit par un angle de frottement plus élevé ($\phi' = 33^\circ$) pour le sable déposé par diffuseur, tandis que le refoulement en surface conduit à un angle de frottement de 27° (*Figure 8*). Cette amélioration des caractéristiques mécaniques des terrains obtenue grâce à la technique de remblaiement par diffuseur peut, dans certains projets de remblaiement sous eau, garantir la stabilité des talus sans avoir besoin de recourir à des techniques de renforcement des terrains. Cela représente donc des avantages sur les coûts et le planning qu'il faut considérer.

Outre l'amélioration de la compacité, les diffuseurs présentent un autre avantage majeur grâce à la largeur de leur crépine et aux faibles distances de chute des grains. Ils permettent donc une distribution beaucoup plus uniforme des matériaux de dragage sur toute la zone de remblai par rapport au refoulement en surface, qui est souvent plus localisé et qui engendre une ségrégation. Cette répartition

uniforme contribue à réduire les variations de densité et de compacité, renforçant ainsi la résistance globale du remblai.

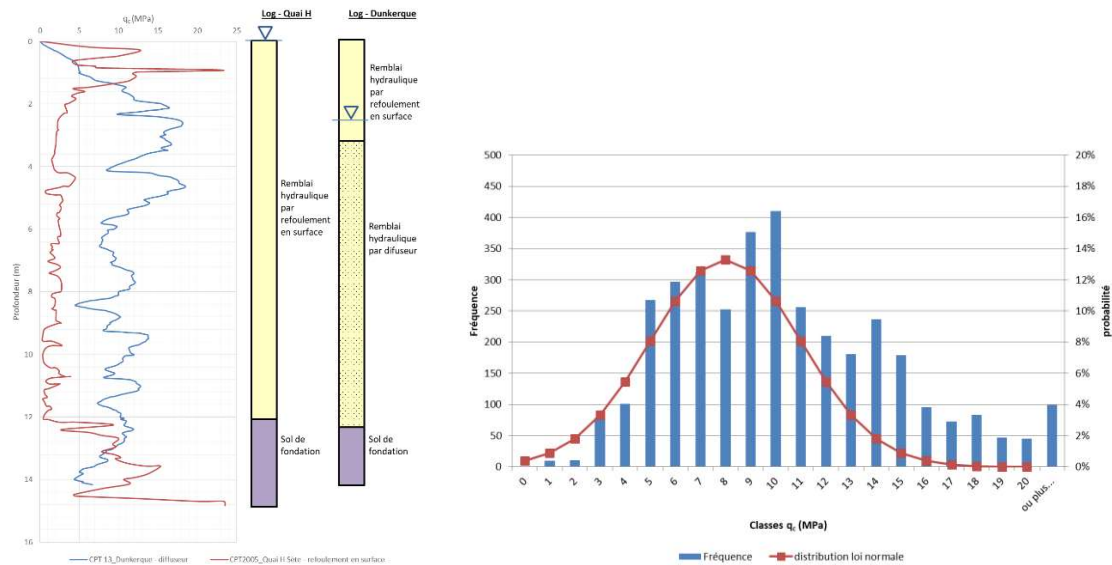


Figure 8 : CPTs avant traitement comparaison entre le quai H à Sète et le comblement de darse à Dunkerque (à gauche le q_c des CPTs, à droite la distribution des q_c à dunkerque).

Enfin, l'utilisation de diffuseurs permet de réduire la turbidité de l'eau ce qui lui confère un certain avantage environnemental lorsqu'il est utilisé, comme à Dunkerque, en parallèle de la construction de la digue. Cette réduction préserve la qualité de l'écosystème aquatique en minimisant les conséquences sur la vie marine et les espèces environnantes. En évitant la dispersion excessive de matériaux de dragage dans l'eau, les diffuseurs contribuent à maintenir l'équilibre écologique de la zone.

6. Conclusions et perspectives

L'utilisation de diffuseurs dans les travaux de remblais hydrauliques offre une série d'avantages substantiels. De la stabilité améliorée des remblais à la minimisation des effets environnementaux, en passant par l'optimisation des coûts et l'accélération des travaux, cette technique se positionne comme un outil précieux pour les travaux de remblaiements en milieu aquatique.

Bien que les avantages de la technique de remblaiement par diffuseur soient évidents, des opportunités d'amélioration subsistent. La collecte continue de retours d'expérience est essentielle pour mieux comprendre les paramètres clés qui influent sur les résultats, tels que le design du diffuseur, la vitesse des grains en sortie, etc. Il nous apparaît donc important d'acquérir cette connaissance approfondie qui pourra guider les ingénieurs dans l'optimisation des opérations futures utilisant cette technique.

Références :

1. A. Pacquetet, Construction du quai H dans le port de Sète, Revue Travaux n°922, mars 2016

Auteur principal : de Calonne Jean-François – ARTELIA – jean-francois.de-calonne@arteliagroup.com – 2 impasse Claude Nougaro, 44 800 Saint-Herblain - France

Co-auteurs : Paireau Osanne – ARTELIA – 6 rue de Lorraine, 38432 Echirolles – France

Mots clés/Key words : Changement Climatique, vulnérabilité, adaptation, planification

Quelles solutions face au changement climatique pour le port unique de l’île Maurice ?

Résumé de l’article :

Les opérations portuaires du port de Port Louis, unique port commercial de l’île, sont régulièrement suspendues en raison notamment d’inondations des quais qui endommagent les installations portuaires et les marchandises stockées. Les aléas climatiques (élévation du niveau moyen de la mer, augmentation de la fréquence et de l’intensité des cyclones) entraînent pour le port une augmentation des durées d’interruption des opérations et une hausse des coûts pour la communauté. Des solutions d’adaptation doivent être mises en œuvre afin de réduire les risques et les pertes économiques du pays. L’accompagnement du port pour développer sa résilience face aux impacts du changement climatique a consisté à :

- modéliser les différents aléas climatiques (cyclones, niveau de la mer...) sur la période 2020-2100 ;
- analyser et quantifier les risques climatiques par typologie et par zone portuaire ;
- évaluer le coût économique du changement climatique ;
- prioriser les mesures d’adaptation avec la mise en œuvre d’un plan d’action.

La mise en place de solutions d’adaptation passe par une analyse technico-opérationnelle abordée sous le prisme économique. Il a été comparé le coût économique de l’inaction avec le coût du plan d’action et les bénéfices associés, c’est à dire la quantification en termes monétaires de l’impact du changement climatique et la mesure de l’efficacité des solutions d’adaptation (réduction des jours d’interruption, dommages, etc.). Si la rentabilité financière n’est pas toujours avérée, la justification d’une rentabilité économique peut quant à elle permettre d’accéder à des financements dédiés par les différents bailleurs de fonds. L’autorité portuaire de Port-Louis dispose ainsi des éléments nécessaires pour solliciter un soutien financier à la mise en œuvre du plan d’action auprès du Fond Vert pour le Climat.

Remerciements : Les auteurs remercient le Climate Technology Centre & Network pour le financement et Mauritius Port Authority pour sa collaboration.

Article's abstract :

Only commercial port in Mauritius island, Port Louis port's operations are regularly suspended due to flooding of the quays, damaging port facilities and stored goods. Climatic hazards (average sea level rise, cyclones frequency and intensity increase) lead to port's operations interruption for longer periods and ultimately increase the costs of imported goods for the community. Adaptation solutions need to be implemented to reduce the risks and economic losses for the country. Supporting the port in developing its resilience to climate change impacts consists in :

- modelling climatic hazards (cyclones, sea levels, etc.) over the period 2020-2100;
- analysing and quantifying climate risks by type and by port area;
- evaluating the economic cost of climate change and;
- prioritising adaptation measures with the implementation of an action plan.

Implementation of adaptation solutions requires a technical-operational analysis approached from an economic perspective. The economic cost of inaction was compared with the cost of the action plan and its associated benefits, i.e., the quantification in monetary value of the climate change impact and the adaptation solutions effectiveness assessment (reduction of interruption period, damage, etc.). Financial profitability being not always proven, an economic profitability assessment may facilitate access to dedicated fundings. With the performed study, Port-Louis Port Authority has the necessary information and data to seek financial support from the Green Climate Fund for the action plan implementation.

Acknowledgements: The authors would like to thank the Climate Technology Centre & Network for its funding and the Mauritius Port Authority for its collaboration.

Article :

1. Introduction et enjeux

1.1 Introduction

Le port de Port Louis est exposé aux risques liés aux conditions météorologiques et aux effets du changement climatique, tels que l'élévation du niveau de la mer, les tempêtes, l'impact des vagues et du vent, les précipitations et les inondations, ainsi que l'augmentation de la température de l'eau. Ces dernières années, les opérations portuaires ont été temporairement suspendues en raison de conditions météorologiques défavorables incluant des vents forts, y compris des vents cycloniques, et des fortes houles inondant les zones terrestres portuaires entraînant entre autres l'interruption des opérations et la dégradation des marchandises stockées. Le changement climatique entraîne un risque d'arrêts plus fréquents des opérations, ainsi qu'un risque d'usure accrue des structures, entraînant une augmentation des efforts sur les infrastructures et superstructures et coûts de maintenance.

Le Ministère de la Sécurité Sociale, de la Solidarité nationale, de l'Environnement et du Développement Durable a souhaité évaluer la vulnérabilité du port de Port Louis aux changements climatiques et identifier les solutions spécifiques permettant d'atténuer les effets adverses sur le port.

Les objectifs visés par l'étude sont :

- Compréhension des aléas climatiques, de leur évolution et de la part des aléas due au changement climatique ;
- Compréhension des impacts sur les différentes zones du port ;
- Evaluation du coût économique du changement climatique sur le port ;
- Priorisation des mesures d'adaptation ;
- Justification du bien-fondé des solutions au regard des enjeux économiques ;
- Plan d'action.

L'enjeu de l'étude est la l'évaluation et la justification économique de la mise en œuvre d'un projet d'atténuation d'impacts liés au changement climatique.

2. Article

2.1 Compréhension des aléas climatiques actuels

Le port de Port Louis est exposé à un certain nombre de risques climatiques combinés, notamment les tempêtes, les inondations et les épisodes cycloniques plus puissants et plus fréquents, ce qui met à l'épreuve la résilience des infrastructures portuaires tout en perturbant la chaîne d'approvisionnement. Pendant de nombreuses années, le port a connu des périodes de fermetures régulières, représentant de 5 à 40 jours par an, en raison d'une combinaison de vents excessifs, de houle, de précipitations et de cyclones.

L'étude a dans un premier temps permis de faire un état des lieux de l'historique des impacts et des dommages (qualitative ou quantitative si les données sont présentes).

Cet état des lieux a permis de faire un premier bilan de connaissances pour les différents aléas identifiés tels que les cyclones, la pluie, les vagues ainsi que pour les données naturelles utiles à la poursuite de l'étude et la modélisation des aléas futurs tels que le niveau de la mer, le vent, la houle et la pression atmosphérique.

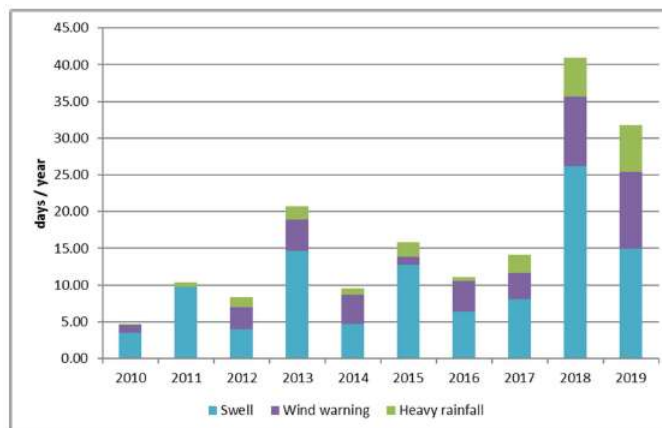


Figure 1 - Durée d'arrêt par an et en fonction des différents aléas climatiques

2.2 Projections climatiques

Les projections climatiques sont réalisées sur le port de Port Louis pour chacun des aléas identifiés et sur la base de l'état des lieux, d'hypothèses d'évolution du climat et de modèles de simulation d'événements climatiques. Les conditions naturelles projetées sont :

- Le niveau de la mer
- Le vent,
- La houle
- La pluie
- La température de l'eau
- La température de l'air

Les inondations marines ou côtières résultent de la combinaison de différents facteurs. L'inondation directe se produit si le niveau de la mer est plus élevé que le niveau de la terre (y compris la défaillance des protections côtières), tandis que l'inondation indirecte se produit par le débordement des vagues lorsque le franc-bord est faible.

Le niveau de l'eau sur la côte dépend des facteurs suivants :

- le niveau de la marée astronomique ;
- une surélévation d'origine atmosphérique causée par une dépression ;
- l'action du vent sur la surface de la mer ;
- l'action des vagues déferlantes qui provoquent une élévation moyenne supplémentaire du niveau de la mer appelée "set-up".

La houle au niveau de la côte dépend de la houle au large et de sa propagation vers la côte.

Le modèle hydrodynamique développé pour cette étude est réalisé sur le logiciel TELEMAC-2D, faisant partie du système TELEMACMASCARET, propriété d'EDF R&D et développé par un consortium dont ARTELIA fait partie (www.opentelemac.org). Cette modélisation intègre :

- la représentation hydrodynamique (variations temporelles du niveau d'eau et des courants) tant du côté maritime que du côté terrestre ;
- la représentation de la propagation des vagues au niveau maritime ;
- le calcul de franchissement à l'interface constituée par le système de protection côtière.

Le franchissement sur le port de Port Louis est ainsi modélisé à différents horizons et selon différentes hypothèses (évolution du climat). Cette analyse permet notamment d'estimer la surface et hauteur de submersion selon différents scénarios d'évolution du climat (RCP 2,6 ; RCP4,5 ; RCP8,5) :

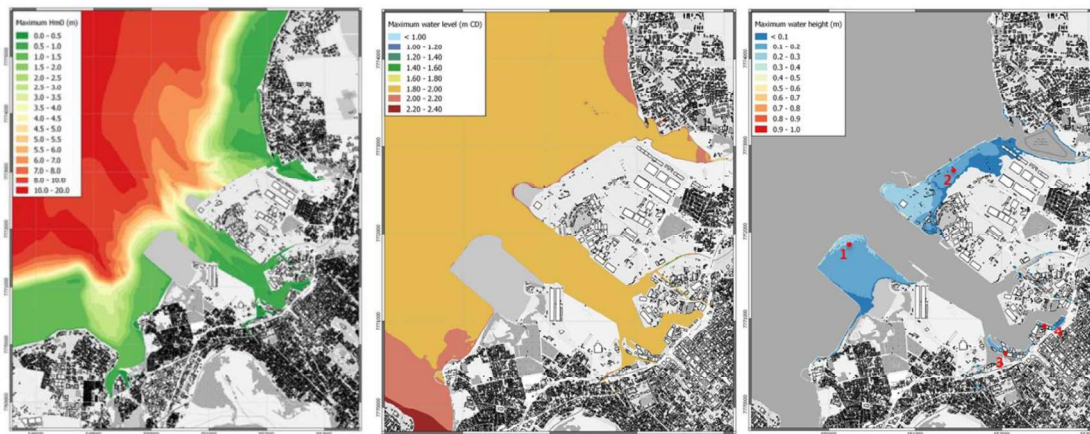


Figure 2 - Représentation graphique des modèles de submersion (Source - ARTELIA)

2.3 Vulnérabilité

En parallèle des projections climatiques, une analyse de vulnérabilité est réalisée pour le port de Port Louis. Cette analyse macro et sectorielle permet ainsi d'identifier et de qualifier la vulnérabilité des infrastructures, des équipements, des opérations et des hommes.

L'évaluation de la vulnérabilité du port résulte du croisement et de la qualification des risques climatiques avec les actifs et les opérations du port. L'analyse met ici en évidence que :

- les modifications des précipitations, du vent et des vagues (climat normal ou extrême) et du niveau de la mer semblent être les aléas climatiques les plus problématiques ;
- la principale conséquence de ces aléas concerne le temps d'arrêt pour un terminal spécifique ou pour l'ensemble des opérations portuaires.

2.4 Détermination de la Valeur Ajoutée Economique (VAE)

Abordée sous le prisme économique, l'évaluation du coût du changement climatique sur le port de Port Louis est réalisée au travers de l'analyse de la Valeur Ajoutée Economique. Cette notion mesure la contribution d'un producteur, d'une industrie, d'un secteur ou d'une région à l'économie.

L'évaluation de la contribution économique du port va au delà de la zone portuaire. Considérés comme "entonnoirs" pour le développement économique d'un territoire, les ports agissent comme catalyseur et contribuent à trois types d'effets majeurs :

- Les effets directs : Activité économique découlant de l'activité portuaire elle-même ;
- Les effets indirects : Activité économique des entreprises qui importent ou exportent des marchandises à partir du port ;
- Les effets induits : Activités économiques des fournisseurs de « facteurs de production », tels que les revenus de la main-d'œuvre directement employée dans les activités liées au port et les revenus des industries qui fournissent le port en biens et services, créant ainsi des emplois indirects.

Sur cette base méthodologique, la création de valeur économique est évaluée pour chacun des terminaux et zones portuaires de la zone d'étude.

2.5 Le coût du changement climatique

2.5.1 Méthodologie

Le coût du changement climatique ne doit pas être confondu avec le coût des risques climatiques. Alors que le coût des risques climatiques peut être considéré comme l'évaluation des impacts actuels des événements climatiques, le coût du changement climatique est quant à lui l'évaluation du coût supplémentaire causé par l'évolution du climat. Les différentes typologies de coûts retenues sont les suivantes :

- temps d'arrêt des opérations : Considérant que le changement climatique affectera les opérations portuaires et, en conséquence, les recettes portuaires ;
- dommages aux actifs : Le changement climatique peut affecter les infrastructures physiques et les actifs fonciers, y compris les recettes potentielles liées à la non-utilisation (exploitation, location, concession, etc.) ;
- autres coûts : Le changement climatique peut affecter diverses dépenses (consommation d'énergie, assurance, maintenance...).

En d'autres termes, le coût économique du changement climatique correspond au manque à gagner de création de valeur économique dû au changement climatique.

La méthode appliquée à l'évaluation du coût du changement climatique à horizon long terme fait appel à la notion de taux d'actualisation. Sur des échelles de temps longues, comme c'est le cas pour cette

étude, le choix de la valeur du taux d'actualisation est particulièrement important car il permet de donner une valeur présente à des dommages ou des actions susceptibles de s'étaler sur plusieurs décennies (Stern, 2006 ; Dasgupta 2008).

Se basant notamment sur le rapport sur le climat de l'économiste Stern (2006) ainsi que des conclusions de l'analyse du Centre for Climate Change Economics and Policy (CCCEP) sur la valeur du « Social Discount Rate » pouvant être appliqué, nous retenons pour l'étude un taux d'actualisation de 2%. Ce faisant, les dommages climatiques auxquels les générations à venir feront face ont une valeur actuelle élevée, favorisant et légitimisant ainsi une action immédiate afin d'y faire remédier.

2.5.2 Evaluation du coût du changement climatique

Le coût du changement climatique est estimé sur une période donnée. Pour les besoins de l'étude, ce coût est estimé pour une période de 80 ans (horizon 2100 à la demande du Client), en tenant compte de l'évolution progressive des risques climatiques d'aujourd'hui à 2100.

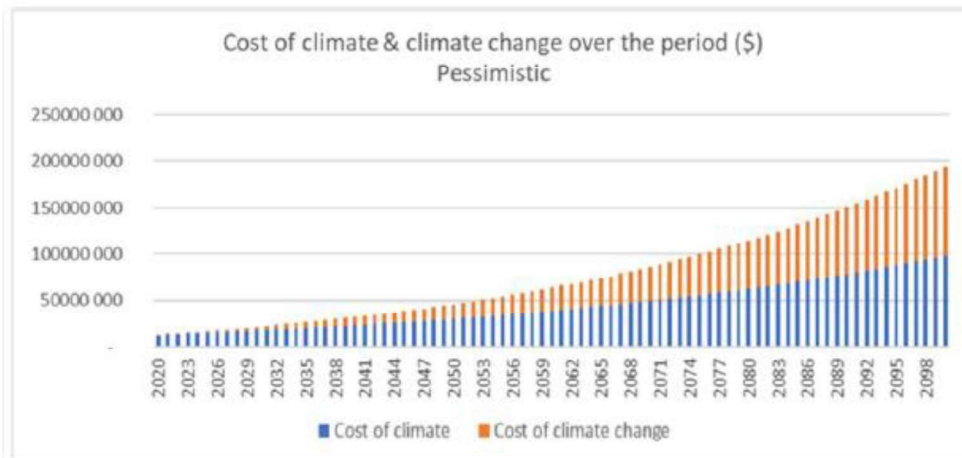
Le coût du climat est évalué pour chaque impact pour l'année 2020 sur la base des informations climatiques actuelles et des données fournies pour l'étude.

Afin d'évaluer le coût du changement climatique, les mêmes données économiques sont utilisées pour la période 2020 à 2100, ajustées en fonction des hypothèses macroéconomiques (croissance du PIB...) et actualisées dans le temps (au travers du taux d'actualisation).

Le coût du changement climatique dû aux arrêts d'exploitation est la différence de coût entre le coût du climat sans évolution climatique et le coût du climat selon plusieurs scénario d'évolution du climat pour la période 2020 à 2100.

Le temps d'arrêt dû à l'agitation excessive des vagues représente environ 87 % du coût total du changement climatique. Le franchissement augmente en effet rapidement avec la diminution du franc-bord en raison de l'élévation du niveau de la mer. A titre d'exemple, pour le scénario climatique moyen RCP 4.5, le temps d'arrêt d'exploitation du port passe de 10 jours par an dans la situation actuelle à 47 jours par an en 2100.

La plupart des coûts sont directement liés à la perte de revenus pendant ces périodes d'arrêt des opérations. Cet exercice, bien que basé sur des choix subjectifs illustre comment une faible augmentation d'un paramètre donné peut, pour des valeurs extrêmes, entraîner une forte augmentation de sa fréquence associée et donc de son coût.



Plus généralement, sur la période de l'étude, le coût du changement climatique augmente le coût total du climat de 16% pour le scénario optimiste et de 61% pour le scénario pessimiste.

Le coût total du climat et le coût du changement climatique en particulier sont, toutes incertitudes considérées, suffisamment importants pour justifier l'investissement dans des actions concrètes visant à atténuer les effets du changement climatique.

2.6 Plan d'action

2.6.1 Général

La méthodologie du plan d'action est fortement inspirée des travaux réalisés par le PIANC et décrits dans le guide PIANC – EnviCom WG Report n°178 : Climate Change Adaptation planning for Ports and Inland Waterways.

Le plan d'action et d'investissement s'appuie sur cette base :

- Sélectionner les mesures d'adaptation en fonction des résultats de l'analyse multicritères, du retour d'information des autorités portuaires, y compris les mesures déjà mises en œuvre, et en évitant les mesures d'adaptation mutuellement exclusives ;
- Définition des objectifs clés et hiérarchisation des mesures d'adaptation en fonction de la criticité de l'impact traité. Les objectifs retenus sont les suivants :
 - Améliorer les connaissances sur le changement climatique ;
 - Limiter l'augmentation des coûts d'entretien et de réparation due au changement climatique ;
 - Permettre un accostage et un fonctionnement des quais continus et sûrs au terminal MCT ;
 - Assurer la continuité et la sécurité des opérations dans le port.
- Définir les détails de la mise en œuvre et le calendrier général de chaque mesure d'adaptation.

Les conclusions du plan d'action font notamment ressortir la mise en œuvre d'un ouvrage de protection en entrée du port afin de limiter l'impact de la houle sur les opérations à quai au niveau du terminal à conteneurs. Au regard des coûts élevés de ce type d'ouvrage, la suite de l'étude a notamment porté sur la faisabilité d'un brise lame et les bénéfices escomptés de l'ouvrage sur le port de Port Louis et plus précisément au niveau du terminal à conteneurs.

2.6.2 Etude de faisabilité d'un brise-lames

Sur la base d'une analyse multicritère avec la participation des principales parties prenantes, la faisabilité d'un brise-lames en mer a été étudiée de manière préliminaire. Le niveau de protection du brise-lames a pu être modélisé sur le logiciel TELEMAT-2D et selon les mêmes scénarios d'évolution des aléas climatiques identifiés dans les phases précédentes.

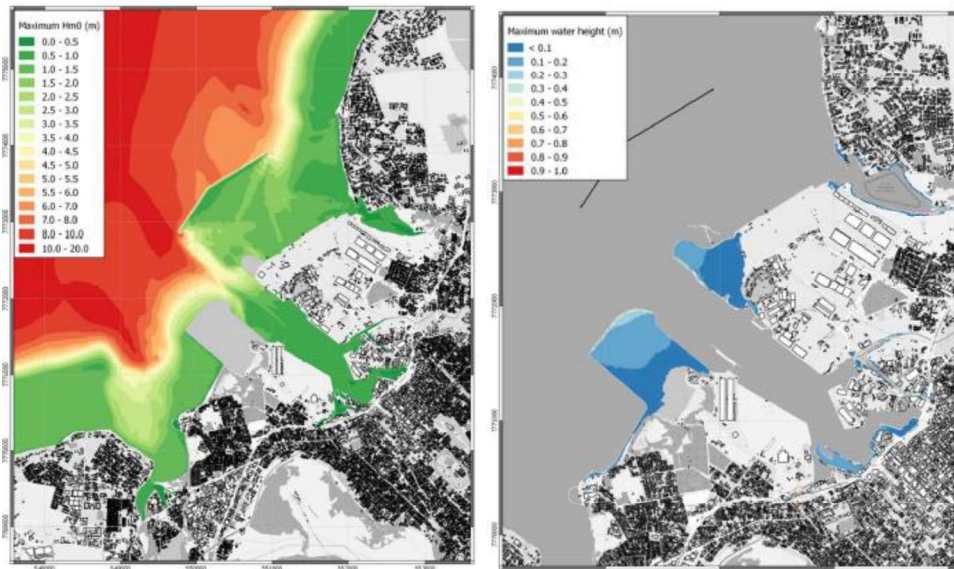


Figure 3 - Modélisation de la houle et du franchissement après installation d'un brise-lames (Source - ARTELIA)

La modélisation numérique a permis de dimensionner au plus juste le brise-lames afin d'atteindre le niveau souhaité de protection contre la submersion et franchissement des vagues, principalement au niveau du terminal à conteneurs.

Les coûts de mise en œuvre d'un tel ouvrage de protection ont pu être comparés aux bénéfices économiques pour l'île (ex : diminution du nombre de jours d'arrêt d'exploitation du terminal et du coût économique associé). La justification économique d'un tel ouvrage peut ainsi être démontrée.

2.7 Sources de financement

Les conséquences du changement climatique sur une organisation peuvent donc engager des dépenses d'infrastructures supplémentaires dont le coût est non négligeable et ne pouvant pas toujours être financé par les autorités publiques ou les investisseurs privés (opérateurs portuaires). Ces dépenses peuvent être financées de différentes manières telles que :

- Les mécanismes et fonds spécifiques mis en place par la communauté internationale pour financer les efforts d'adaptation ;
- Les fonds de développement des pays ;
- Les banques de développement.

Les sources les plus importantes de financement spécifique pour l'adaptation au changement climatique sont principalement constituées de fonds multilatéraux, de source bilatérale ou encore de banques de développement. D'autres sources de financement moins conventionnelles sont également possibles (secteur privé, marché des obligations) mais des garanties de performances financières sont généralement attendues et prépondérantes pour l'obtention dudit financement.

3. Conclusion et perspectives

Au delà du bien-fondé et de la justification technique d'une solution technique en réponse à un besoin, ici l'atténuation d'un impact lié au changement climatique, il est nécessaire d'élargir la réflexion à d'autres critères décisionnels fondamentaux dans la prise de décision relative à sa mise en œuvre.

Les impacts liés au changement climatiques sont de plus en plus visibles mais :

- Il peut être difficile de dissocier l'impact lié au climat de l'impact lié au changement climatique ;
- L'évolution des impacts se fait sur une échelle relativement longue comparativement à la durée de vie d'une infrastructure.

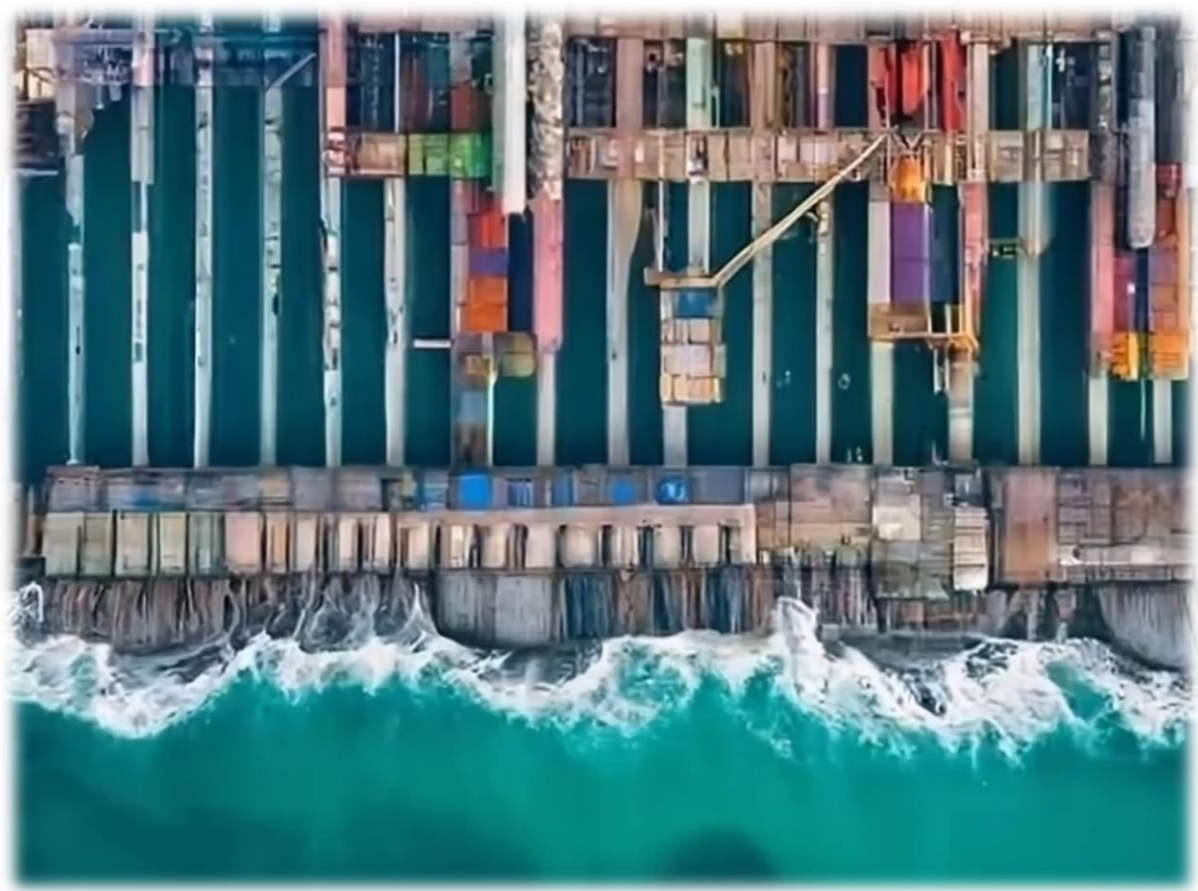
Certains projets visant à atténuer les impacts liés au changement climatique peuvent se retrouver confrontés à un manque d'intérêt de la part des investisseurs privés du fait de leur faible rentabilité financière (Taux de rentabilité internes inférieurs aux standards des secteurs d'investissement) du fait :

- de montants d'investissement initiaux pouvant être importants ;
- de metrics financiers peu attractifs du point de vue de l'investisseur.
 - payback de l'investissement après une période trop longue ;
 - taux de Rentabilité Interne (TRI) inférieur aux taux acceptables pour les investisseurs ;
 - VAN faible voire négative.

Parti de ce constat, et dans le cas d'un besoin de financement, il est nécessaire pour le porteur du projet de reconsidérer les sources de financement notamment via les fonds de type bailleurs œuvrant pour le climat. Ces derniers disposent d'une approche fondée entre autres sur des enjeux environnementaux, économique et sociaux, et ne se limitent pas aux seuls enjeux financiers.

A ce titre, la justification économique d'un projet lié à l'atténuation d'impacts liés au changement climatique prend tout son sens.







Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)

Ref. Author : Vittoria Puzone–University of Naples "Parthenope", Department of Engineering–
vittoria.puzone001@studenti.uniparthenope.it
Centro Direzionale ISOLA C4, 80133 Naples, Italy.

Co-authors :

Elena Valentino– Port System Authority of the Central Tyrrhenian Sea - e.valentino@porto.salerno.it
Via Roma n°29, 84121, Salerno, Italy.

Felice Arena- Mediterranean University of Reggio Calabria- Department of Engineering - arena@unirc.it-
Via Graziella - Vito - 89122 Reggio Calabria, Italy

Giudo Benassai- University of Naples "Parthenope", Department of Engineering–
benassai@uniparthenope.it
Centro Direzionale ISOLA C4, 80133 Naples, Italy.

Alessandra Romolo- Mediterranean University of Reggio Calabria- Department of Engineering -
aromolo@unirc.it-
Via Graziella - Vito - 89122 Reggio Calabria, Italy

Keywords : Dredging, sustainability, Port of Salerno, breakwaters extension.

Titre de l'article: Dredging and extension works for the Port of Salerno

Résumé de l'article: Le dragage est un élément crucial de l'expansion portuaire et joue un rôle important dans la facilitation du commerce international. Cet article présente les travaux d'extension et de modernisation du port commercial de Salerne, qui ont nécessité d'importants travaux de dragage. La modernisation a également impliqué l'extension du brise-lames par la construction de caissons avec production d'énergie houlomotrice (système REWEC3), pour lequel Wavenergy.it S.r.l. est le détenteur exclusif d'une licence. Une analyse préliminaire a été menée pour définir les conditions initiales des propriétés physiques, chimiques et biologiques de l'environnement pélagique du port, de la surface au fond. Les analyses chimiques des sédiments ont été organisées pour construire un indice de danger chimique basé sur le nombre de contaminants dépassant la référence spécifique, conformément aux réglementations italiennes sur le niveau chimique de base (BCL) et le niveau chimique limite (LCL). En outre, le document présente également les résultats de la surveillance des zones de dragage, auxquelles des systèmes d'alerte précoce auraient pu être associés en cas de dépassement des seuils d'impact (par exemple, la turbidité). La surveillance a été planifiée en trois phases: ante operam, pendant la construction et post operam. La surveillance comprenait également l'analyse des caractéristiques physiques de la colonne d'eau grâce à l'utilisation d'une sonde multiparamétrique CTD qui mesurait la turbidité et l'oxygène dissous en termes de concentration et de pourcentage de saturation.

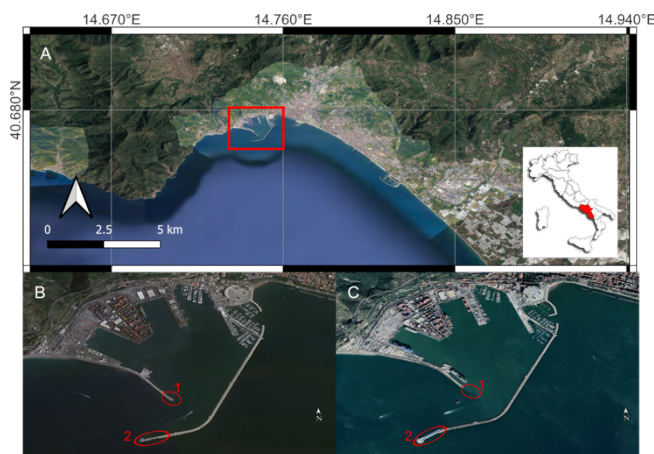
Article's abstract Dredging is a crucial component of port expansion and plays an important role in facilitating international trade and commerce. This paper reports the extension works and upgrading of the Commercial Port of Salerno, which needed extensive dredging works. The upgrading also involved the extension of the breakwater through the construction of caissons with wave energy generation (REWEC3 system), for which Wavenergy.it S.r.l. is the exclusive licensee. A preliminary analysis was conducted to define the starting conditions of the physical, chemical and biological properties of the port pelagic environment from the surface to the bottom. Chemical analyses of the sediments were organized to construct a chemical hazard index based on the number of contaminants exceeding the specific reference, according to the base chemical level (BCL) and limit chemical level (LCL) Italian regulations. In addition, the document also reports the results of monitoring the dredging areas, to which early warning systems could have been associated if impact thresholds were exceeded (e.g., turbidity). Monitoring was planned in three phases: ante operam, during construction, and post operam. Monitoring included also the analysis of the physical characteristics of the water column through the use of a CTD multiparameter probe that measured turbidity and dissolved oxygen in terms of both concentration and percentage of saturation.

Article :

1. Introduction.

In recent years there has been increasing recognition of the importance of managing dredging activities and assessing their social, economic and environmental impacts, both in developing and industrialized countries. This trend is driven by the expansion of international trade and the increasing size of modern ships, which require deeper waterways. As a result, ports must undertake dredging activities to improve or maintain their economic competitiveness by deepening their waterways [1]. The Port of Salerno is one of the most efficient and dynamic ports in Italy, representing an important junction of the Motorways of the Sea and was one of the first ports for container handling and among the first hubs for automobile transport. Thanks to the creation of new shipping lines and the construction of modern infrastructure, such as the new Maritime Station designed by architect Zaha Hadid, cargo and passenger traffic has increased with a steady trend, in a highly touristic basin with great landscape, historical, cultural and archaeological value. This paper describes the trend of implementing a sustainable approach in the context of the expansion of the Port of Salerno, minimizing the negative impacts on the environment, while enhancing its economic and social performance.

The dredging and extension works were necessary to accommodate large ships, allowing maneuvering in total safety. In 2010 a master plan was implemented the following maritime works: the widening of the port's mouth to facilitate the maneuvering of larger ships and increase the safety of shipping maneuvers, the dredging of the seabed to entrance the channel depth and the berths to accommodate larger ships, and finally, the extension of the inner Pier. Environmental actions on dredging consisted, on the one hand, in minimizing negative impacts on the environment through proper management of sediments, which were carefully analyzed as required by Italian standards and laboratories. On the other hand, careful monitoring was pursued to minimize the possible negative effects of sediment suspension on water turbidity [2]. The environmental quality of the sediments was assessed on the bases of different analysis moreover the monitoring of the disturbs induced by the dredging works on the marine environment was performed in different construction phases. The sediment quality was evaluated on the bases of physical, chemical and ecotoxicological analyses, while the monitoring phase consisted on evaluating the diffusion of turbidity produced by dredging operations and by the deposition of sediments [3]. The sustainable approach to the extension of breakwaters was pursued through the construction of



caissons converting the pneumatic energy of the chambers into electrical energy by means of bidirectional turbines.

The paper is structured as follows: Section 2 reviews the breakwater extension initiatives, Section 3 focuses on the dredging sustainable actions, Section 4 gives the results of the analyses and the monitoring campaigns.

Figure 1: A) Overview of the study area Gulf of Salerno and its harbour (red rectangle); zoomed-in version of Salerno harbour at 06/29/2016 (Satellite image Landsat Copernicus) in (B), at 22/01/2022 (Satellite image 2022 Maxar Technologies) in (C). Points 1 and 2 highlight the areas involved by the interventions.

2. Breakwater extension sustainable approach

The expansion of the port's mouth allows the transit of new generation ships, requiring a draft of up to 14 m reserved for passenger and cargo traffic, in full functionality and safety. The sustainable approach to this issue takes into account environmental issues and innovation. In fact, the extension of the breakwater was implemented through the construction of REWEC3 caissons, which produce energy from waves while acting as a wave absorption system, reducing their reflection in the basin. The interventions included hauling out the end section of the breakwater and demolition of the associated concrete superstructures for a length of 100 m with reconfiguration of the breakwater. In addition, the extension of the breakwater was planned, for a total length of 200 m, according to an 18° inclined alignment towards the open sea, through the construction and installation of reinforced concrete cellular caissons, arranged in alignment with the existing quay and filled with demolished material. The caissons were equipped with geometrically shaped external cells according to the Rewec 3 patent (Italian patent No. 1332519 by Prof. Paolo Boccotti; European patent No. EP 1 518 052 B1, of which Wavenergy.it S.r.l. is the exclusive licensee).

3. Dredging sustainable actions

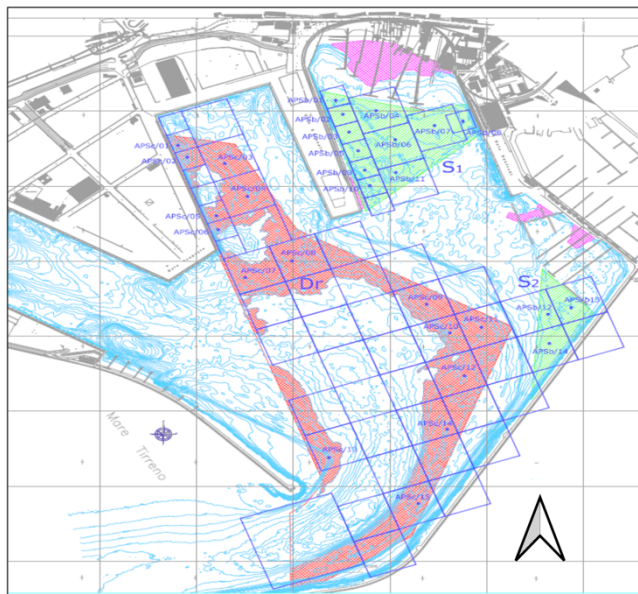
The dredging process typically involves extracting significant amounts of sediment from the beds of water bodies such as rivers, lagoons and canals to increase their depth and width; the extracted sediment is deposited in designated locations. In 2014 study [4], different approaches for managing these sediments were explored, including dredging guidelines, ecological considerations, economic constraints and disposal alternatives for dredged sediment. The Commercial Port of Salerno was affected by dredging work as early as 2004. The intervention concerned the harbor mouth and evolution basin which involved a volume of 1.138.607 m³. From the sampling and characterization plan drawn up by ICRAM (now ISPRA), the dredged material falls into classification A2, i.e. sediment unsuitable for the emerged beach nourishment, but suitable for immersion into the sea according to the "Manual for the handling of marine sediments" of the Ministry of Environment and Marine Protection Tab. 2.2 [5]. The sediment discharge area is located at a distance of 7.5 n.m. offshore the port, and presents a depth of approximately 500 m. In 2012, a second dredging which involved a volume of 106'274 m³ for the deepening of the seabed (up to -12.20 m) of the central dock, the evolution basin and the harbor mouth was performed. In this case, according to the characterization plan, the sediments were again as classified A2, and deposited within the port area. Finally, in the spring of 2013, a preliminary characterization plan was drawn up for the entire port basin and the entrance channel. The sediments presented granulometric, chemical, microbiological and ecotoxicological characteristics similar to those

found in previous dredging works (in 2004 and 2012). This excluded the possibility of their use for nourishment of emerged beaches. The basing depths were 14.50 m in the access channel, in the evolution basin, and inside the central and western docks; 11.50 m in the remaining port areas up to the head of pier 3 and to the line that identifies the extension of the Manfredi pier; 10.00 m along the red platform for a stretch of 20.00 m from the edge. Real-time monitoring during the dredging phases was recognized as the only system capable of avoiding and/or mitigating impacts on the marine ecosystem regardless of the technical solutions adopted for control of the limits exceeding the significant variables representing physical and chemical pollution. The monitoring plan was activated in the proximity of the dredging areas, with real-time data transfer and programming of early warning systems in case of exceeding the impact thresholds (eg. Turbidity).

4. Sediment quality analysis.

4.1 Sediment sampling for physical, chemical and ecotoxicological analysis.

The sediment sampling plan of the Port was carried out in 2012 (Fig.2) consisting in 62 sampling areas with a 50x50 m mesh size system in all inland areas with distances of less than 50 meters from artifacts such as piers, docks and quays. A 100x100 m mesh was used in all remaining areas of the harbor water body, with the exception of the harbor mouth. The number of the analyses varies according



to the dredging depth, so the total number of analyses was 15 [6]. The sediments handling and management options depend on the results of the physical, chemical, microbiological and ecotoxicological analyses. The chemical analyses were taken for the determination of dissolved inorganic nutrients, total dissolved nitrogen and phosphorus, dissolved and particulate metals (As, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn), total organic carbon (TOC), total suspended solids (TSS), and organic compounds in particulate matter (total hydrocarbons, PAHs, and organic compounds) [3].

Figure 2: Salerno Harbor sediment characterization plan prepared in 2012

4.2 Monitoring campaign.

In order to assess the impact on the pelagic environment such as anoxia due to the drastic reduction of dissolved oxygen, monitoring was carried out for the turbidity induced by dredging and sediment deposition operations management. An ante operam, an in-process and finally, a post operam monitoring was performed. The area of the entire harbor was divided into 5 sub-areas, as shown in Fig. 3. The monitoring focused on phytoplankton biomass, turbidity, and pH from the surface to the bottom indicators (temperature, salinity, density, dissolved oxygen, fluorescence), which verify the impact of dredging operations on anoxia due to the drastic reduction of dissolved oxygen [7]. Temperature, salinity, dissolved oxygen, and fluorescence profiles were analyzed with a CTD multi parametric probe.



Figure 3: The five areas into which the Port of Salerno was divided in the sampling plan (A1 (red), A2 (brown), A3 (sky blue), A4 (purple), and A5 (green)), and the sampling points in each areas before (Bn), during (Dn) and after (Pn) the dredging.

5. Results.

5.1 Results of chemical analysis.

With regard to the chemical analyses, trace metal concentration values for the metals arsenic (As), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), lead (Pb), nickel (Ni) and zinc (Zn) were calculated for each sample. Figure 5 shows the results of the chemical analyses for arsenic (As), chromium (Cr), copper (Cu) and mercury (Hg). The threshold value of each metal is given in Tab. 1 of All. 5 of Title V Part Four of DM 152/2006. In Fig. 6 shows the same results for lead (Pb), nickel (Ni) and zinc (Zn). In particular, the arsenic values (Fig.5-a), range from a minimum of 4.28 to a maximum of 25.51 mg/kg p.s., and only four samples exceed the Base Chemical level (BCL), while none exceeds the Limit Chemical Level (LCL). With regard to chromium concentrations (Fig.5-b), the values range from 16.91 to 83.55 mg/kg p.s. Only one sample (APSc-13 50-100), exceeds the BCL but still has a concentration between the BCL and the Limit Chemical Level (LCL). With regard to copper (Fig.5-c), on the other hand, there are 14 samples that record values between the BCL and LCL. Mercury values, insted (Fig.5-d), range from a minimum of 0.02 to a maximum of 0.12 mg/kg and thus below the Base Chemical level values. The same for nickel (Fig.6-e),and lead (Fig.6-f and g) while for zinc, the values in all samples range from a minimum of 15.05 to a maximum of 61.52 mg/kg so in three cases above the Base Chemical Level (BCL), but still under. With regard to the results of microbiological and physical analyses, the spatial distributions of priority hazardous substances and in particular Benzo pyrene [a], Benzo fluoranthene [b], sum PAHs and PCBs, for the different sediment levels, are almost always below both the threshold values indicated in the standard. From this initial characterization and based on the chemical, physical, microbiological and ecotoxicological results and particle size structure sediments were classified as A2 and discharged out of the port area [8].

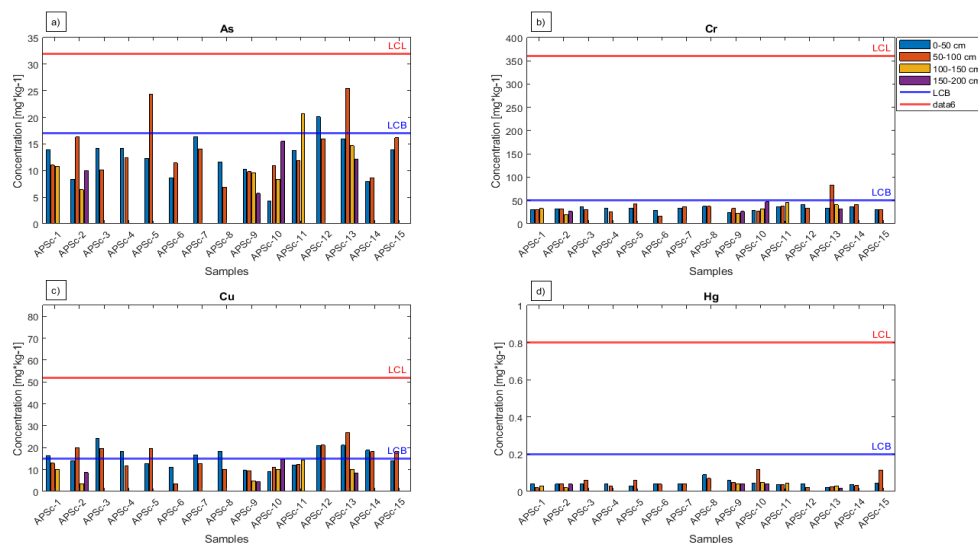


Figure 5: Chemical analyses for arsenic (As), chromium (Cr), copper (Cu) and mercury (Hg).

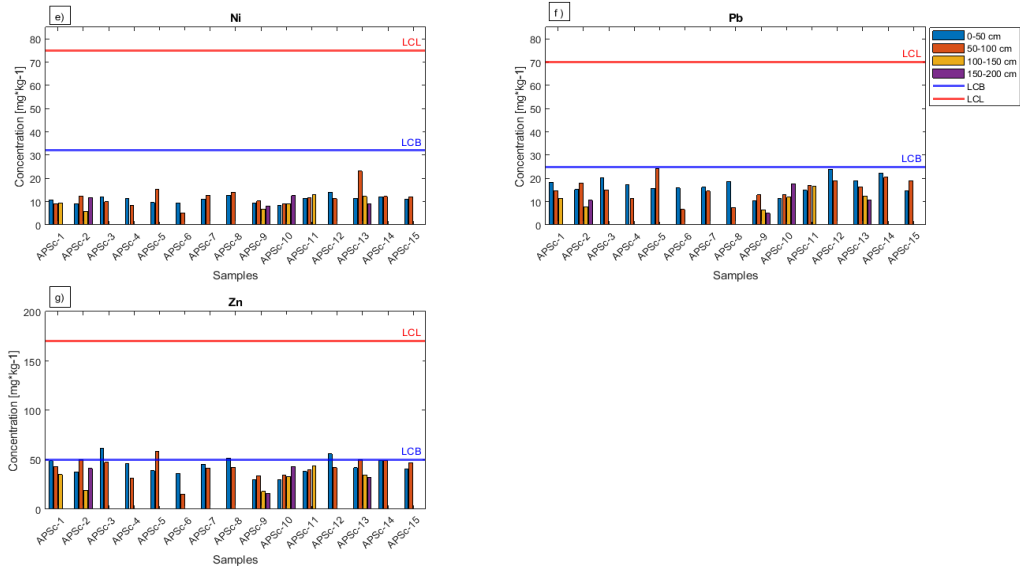


Figure 6: Chemical analyses for lead (Pb), nickel (Ni) and zinc (Zn).

5.2 results of monitoring campaign.

The Fig. 7 and 8 show the results of the dissolved oxygen and turbidity monitoring campaign before, during and after dredging, respectively. More specifically, in fig.7, we can see that before the dredging phase, turbidity affected almost the entire inner harbor area and partly the area adjacent to the inlet and took an average value of about 20 NTU. This was due to vessel traffic and from particular weather conditions, e.g., winds from land to sea. Later, during dredging operations, turbidity assumed more conspicuous values especially in the inland area (Area-2) where a maximum value of 61.05 NTU was recorded. This is justified by the same dredging operations that move the seabed effectively making the water more turbid. Finally, when the work is completed, we can see a drastic decrease of the turbidity in all areas. Moreover, the results show a clear seasonal cycle in which there is complete mixing in the winter period, followed by initial thermal stratification in the spring period. With regard to the distribution of dissolved oxygen in terms of concentration (fig.8) it is consistent with the turbidity values. In particular, it is observed that during the dredging phases, dissolved oxygen values are around 7 mg/l in, on overage, all areas, while at the end of dredging operations, dissolved oxygen concentration increased significantly taking values of around 8 mg/l in some areas (3-4-5). As a matter of fact, the results highlight that the removal of material from the seabed also allowed a recirculation of water positively impacting the marine environment, because sediment suspension and thus turbidity were effectively reduced [7 and 9]. In other words, the results of the turbidity assessment campaign showed that there was no significant impact on the pelagic system because turbidity was almost always contained within the port area, so that the Port of Salerno does not have critical environmental situations such as anoxia or hypoxia. These problems have often been effected the sea bottom after consistent dredging works [10].

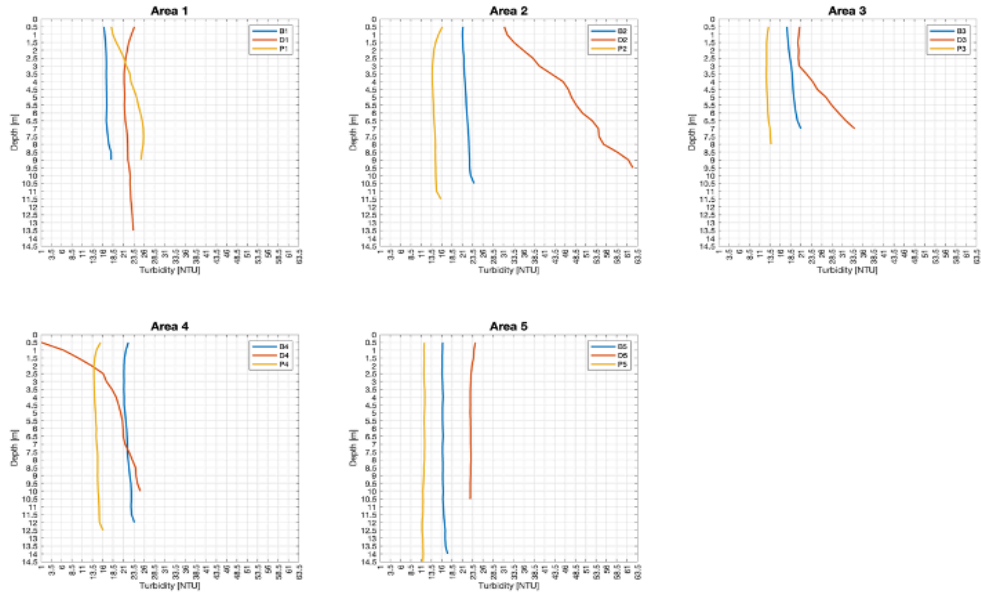


Figure 7: Results of the turbidity water column data results pre-work, during dredging and post-work operations in AREAS 1-2-3-4-5.

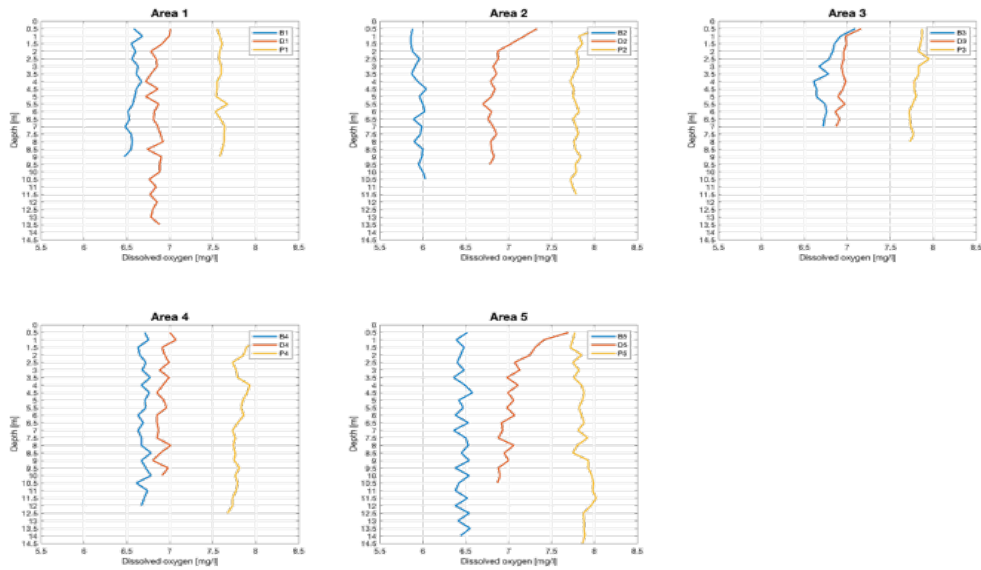


Figure 8: Results of the dissolved oxygen water column measurements data results pre-work, during dredging and post-work operations in AREAS 1-2-3-4-5.

6. Conclusion and perspectives

This study describes the sustainable approach in the grudging of the Port of Salerno, through the analyses of the physical, chemical and biological properties of the sediments. It is worth noting that most metals were within the permitted limits, with only a few samples exceeding the Base Chemical Level (BCL) but still remaining below the Limit Chemical Level (LCL). The results of microbiological and physical analyses, on the other hand, indicated that hazardous substances, including benzo pyrene, benzo fluoranthene, PAHs and PCBs, were well below critical threshold values, demonstrating a positive environmental impact of sediment management and dredging operations. Monitoring dissolved oxygen

and turbidity levels during dredging operations revealed a seasonal cycle in the harbour. Before dredging, turbidity was influenced by vessel traffic and weather conditions, while during dredging turbidity increased due to sediment disturbance. However, some month after dredging, turbidity decreased significantly. Furthermore, the increase in dissolved oxygen concentration indicates positive environmental impacts, as water recirculation was enhanced due to the removal of material from the seabed. The Port of Salerno monitoring campaign revealed that the port did not experience any serious environmental problems such as anoxia or hypoxia. This positive result reflects the port's proactive approach in the early detection of potential environmental impacts, enabling timely interventions to safeguard the marine ecosystem and promote innovation in the maritime sector. The results demonstrate that economic growth and environmental protection can be achieved simultaneously, providing a template for a more sustainable future for ports and coastal regions.

7. References.

- [1] Torres, Ronaldo J, Denis MS Abessa, Fernando C Santos, Luciane A Maranhão, Marcela B Davanzo, Marcos RL do Nascimento, and Antonio A Mozeto. 2009. "Effects of dredging operations on sediment quality: contaminant mobilization in dredged sediments from the Port of Santos, SP, Brazil. *Journal of soils and sediments* 9: 420–432.
- [2] Port Authority of Salerno. 2015. "Nuovo Piano Regolatore Portuale 2015 del Porto Commerciale di Salerno."
- [3] Port Authority of Salerno. 2013a. "Elaborazione dei risultati della caratterizzazione fisica, chimica, microbiologica ed ecotossicologica dei sedimenti del Porto commerciale di salerno e proposta di classificazione degli stessi in relazione ad eventuali operazioni di dragaggio."
- [4] Kwok, Kevin WH, Graeme E Batley, Richard J Wenning, Lingyan Zhu, Marnix Vangheluwe, and Shirley Lee. 2014. "Sediment quality guidelines: challenges and opportunities for improving sediment management." *Environmental Science and Pollution Research* 21:17–27.
- [5] MATTM, ISPRA. 2007. "Manuale per la movimentazione di fondali marini." 26–38–tab.2.2.
- [6] Port Authority of Salerno. 2012. "Interventions for the technical and functional adaptation of the Commercial Port of Salerno." <https://va.mite.gov.it/en-GB/Oggetti/Documentazione/1357/1716>.
- [7] Port Authority of Salerno. 2013b. "Redazione ed esecuzione del piano di monitoraggio relativo all'intervento di dragaggio dei fondali del passo marittimo di accesso, del bacino dei evoluzione e della darsena centrale del Porto commerciale di Salerno."
- [8] Port Authority of Salerno. 2013d. "Relazione tecnica relativa alle analisi di laboratorio dei campioni di sedimento prelevati per mezzo di vibrocorer." 136–215.
- [9] Port Authority of Salerno. 2013c. "Relazione di sintesi delle attività svolte, caratteristiche del materiale dragato, ipotesi prelliminare di classificazione dei sedimenti, sistemi di monitoraggio e mitigazione di eventuali impatti."
- [10] Mariani, Patrizio, et al. "Monitoring and Ming Bio-Physical Parameters for Hypoxia Hazard in a Coastal Sand Pit." *Sustainability* 10.3 (2018): 785.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

**25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)**

Auteur principal : Lourdes– Pecharroman – lourdes.pecharroman@siport21.es– Siport21– C/Chile, 8. Edificio Azasol. Oficina 208. 28290 Las Matas (Madrid) – Spain

Co-auteurs :

Leandro – Pires – leandro.pires@siport21.es – Siport21– C/Chile, 8. Edificio Azasol. Oficina 208. 28290 Las Matas (Madrid) – Spain

Raúl – Redondo – raul.redondo@siport21.es – Siport21– C/Chile, 8. Edificio Azasol. Oficina 208. 28290 Las Matas (Madrid) – Spain

Carlos – Cal – carlos.cal@siport21.es – Siport21– C/Chile, 8. Edificio Azasol. Oficina 208. 28290 Las Matas (Madrid) – Spain

Mots clés/Key words Maritime Transport, Wind Energy, Maritime Infrastructures, Real Time Manoeuvre Simulation

Evaluation of port facilities for transport operations of marine wind generator components

Abstract:

The development of the offshore industry requires the production of large elements (cylindrical structures for wind towers or the blades of wind turbines, among others) that are part of the structures producing clean energy. Many of these elements are transported by sea from ports and terminals that adapt their facilities and waterways to this activity. Therefore, safe operations of the specialized ships that transport this cargo are required.

There are specific ships, such as the Heavy lift vessels, designed to transport this cargo type, with advanced and powerful propulsion systems that provide good propulsion and steering characteristics. In many cases, the pieces they transport extend beyond the limits of the ship (the stern or the beam), and it is necessary to assess the access conditions and the safe navigable area required for these vessels (channel width and depth) and also the airspace to confirm that the manoeuvres are carried out in a safe manner (with safe margins to port structures or port elements).

The use of simulation tools that include the human factor, such as real-time manoeuvring simulators, is very useful for assessing this type of scenarios, in which visual perception is an important point in the operations. The application of the methodology described by PIANC in WG49 Report no.121 “Harbour Approach Channels Design Guidelines”, allows a detailed evaluation of the required navigable areas, and results very useful to identify access limits, critical areas, or improvement points for this type of traffic and port operations.

Article :

1. Introduction and aims

The wind industry and associated technology have continuously advanced in recent years. In addition to the development of new designs, the windmills are becoming larger, which means an increase in efficiency since the use of wind energy is improved. However, with the increase in size, transportation

and logistics also become more complex, and movement of their components has become a serious issue, both by land and by sea.

The production of these large structures (fixed, floating or even complete offshore substations) and various components in shipyards, located in areas close to ports, is a great opportunity for naval industry to offer new services. Thus, shipyards and the auxiliary naval industry have experienced an increase in activity derived from the wind energy segment, combining the activity of construction of offshore wind farm service vessels with the manufacture of wind turbine components, also acting as a logistics hub for the pre-assembly and boarding on the ships.

Logistics companies specialized in offshore projects are also part of this activity, essential in the development and progress of the offshore wind industry and interested in evaluating that port areas allow the development of the wind industry business.

Then, shipyards, logistics companies and ports must have adequate human resources, facilities and technology, adapted and specialized to address the specific complexity of marine wind energy projects.

The size and weight of the components of offshore wind structures mean that the ports that carry out these activities and their terminals must meet specific demanding requirements. Port facilities must be adapted according to their use and allow safe access of large capacity ships. At the same time, they must have storage and lifting capacity. Therefore, being able to adapt ports to this industry (wind energy) will allow them to gain competitiveness within the framework of the marine renewable energy chain.

1.1 Transportation of offshore elements

The increase in size of wind turbines in recent years also make their transportation and logistics more complex. The following image shows the evolution in size of wind turbines since 2000:

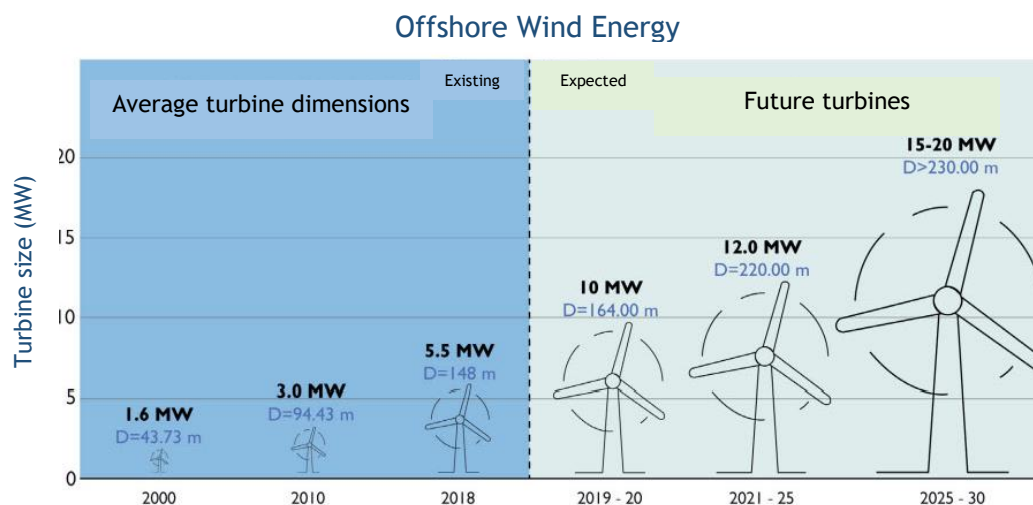


Figure 1 : Evolution of the average size of wind turbines. Source: GE Renewable Energy 201; IRENA 2019c; 20116b; MHI Vestas 2018

The transport of offshore elements is carried out by land (road or train) or by sea. If we refer to land transport, train is only possible in areas of flat orography. However, it becomes impossible in areas with curved stretches, tunnels or bridges. When land transport is done using trucks, a limited number of items can be moved at the same time and security cars are required. Thus, transport by sea is somewhat more cost-efficient, but not easy either. The large blades and towers size limit the storage possibilities onboard the vessels.

Given the complexity and cost of transportation, it is a significant advantage for any producer of wind energy components to be close to regions of strong demand. Therefore, the development of the offshore

industry and the marine energy market requires the existence of special vessels that support the construction, commissioning, and maintenance activities of the offshore wind farms.

1.2 Port facilities

There are several ports providing these services that have adapted their infrastructures, plus technical and human resources, for the production, storage, handling or loading/unloading of wind farm elements. Some examples in Spain are the Ports of Bilbao, Ferrol, A Coruña, Las Palmas, Cádiz, Cartagena, Avilés. Aveiro Port in Portugal and Le Havre or and Saint-Nazaire ports in France are other examples.

In addition to the necessary land infrastructure, the navigable areas in the port must guarantee the safe access of the special ships that transport large-volume wind turbine components. The vessels must be able to safely navigate both in the access channels and in the manoeuvring areas, having adequate depths for navigation and loading/unloading operations, as well as adequate width for the evolution of specialized ships.

1.3 Vessels

Typically, heavy lift vessels transport large wind turbines components. They have a large open deck area where the cargo is stowed (blades, tower components, etc.) and can transport large loads not allowed in conventional ships. They have a low length-beam (L/B) ratio, with a reference value between 3.8 and 4.5, lower than any conventional commercial vessel. The main reason for having a longer beam is to be able to carry heavy weights and meet the IMO stability criteria.

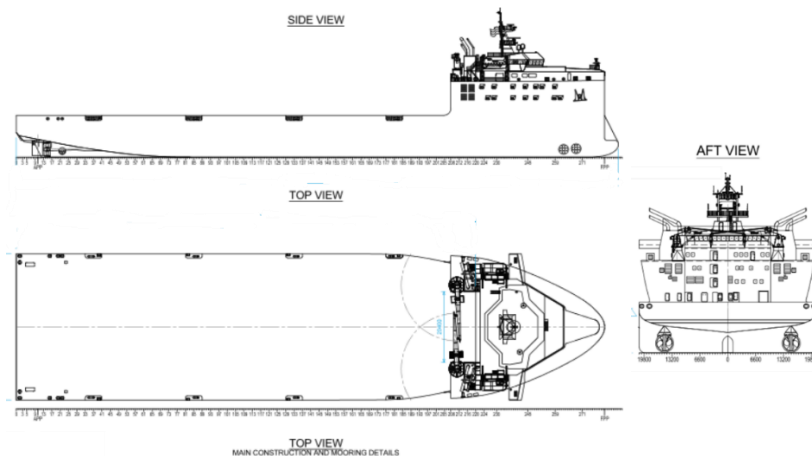


Figure 2 : Reference general arrangement of a heavy lift vessel

Heavy lift vessels can vary their draft, by filling the ballast tanks, up to 16 meters, being able to load on deck cargo that is floating on them with several loading methods (Flo-Flo, Ro-Ro and skidd on). In many cases, they have cranes on deck for cargo handling. The range of loads can vary from 10 t to heavy platforms of 75,000 t. There are different solutions that allow several rows of blades or tower sections to be stacked, which enables the simultaneous transport of many pieces and, therefore, an optimization of the trip.

Propulsion and steering of these vessels include advanced manoeuvring devices, with twin azimuth thrusters and, in most cases, bow thruster propellers. This allows excellent position control in manoeuvring areas at low speed.

2. Nautical accessibility to port facilities

The construction of wind turbines elements is performed in many cases in areas close to ports or in terminals located inside the ports. Therefore, it is essential to guarantee the safe access of the vessels that transport this cargo.

2.1.2 Numerical tools for detailed analysis (Real-time manoeuvre simulator)

The use of simulation tools provides more accurate results than the concept design methodology. It requires detailed input data as well as more time for execution and elaboration of results. The cost is also higher compared to concept design. The application of these tools in port and fairway design is widely spread and accepted since many years.

The use of real-time manoeuvre simulators is the recommended option, and the most appropriate, when the objective is to define the access limits and operability (in terms of maximum wind, waves and current for safe access of a ship), the optimal manoeuvring strategy and/or the required navigable areas associated with a specified risk level (depending on the type of fairway, weather conditions, expected traffic or the type of vessel or cargo among others). In addition, it allows to identify critical areas of interference between the vessel and port structures, moored vessels and/or shallow water areas; or assess the tug requirements since it allows to include tug assistance and their characteristics (type, bollard pull, assisting mode, reduction in effectiveness in waves, etc.). It also includes the human factor, and therefore, a higher level of immersion and reliability.

In addition, Captains and/or Pilots can participate in the assessment and the analysis, and perform training sessions before the manoeuvres are carried out in reality.

2.2 Case study

A case study presents the process to assess the access of heavy lift vessels to a new offshore wind elements production terminal in a port area.

2.2.1 Particular conditions

- Access to the terminal is through a channel with curved and straight sections. The terminal is located in a port area with a large basin, out of the main channel, with several terminals and nearby berths.
- Weather conditions:

Table 1 –Meteorological conditions

Average wind (knots)	Waves (Hs) (m)	Maximum current (knots)
20 kn (exceedance level 2.4%)	3.5 m (exceedance level 5.9%)	Tide current + river discharge 1.5 kn

- Vessels: Heavy lift vessels with cargo that can extend **beyond the beam up to 20 m (both sides)**. Then, in addition to the assessment of navigable area, it is also necessary to evaluate the required aerial area in order to assess interference with port structures. These vessels have twin propellers and a bow thruster and are extremely sensitive to wind when they have cargo stacked onboard due to the high windage area.

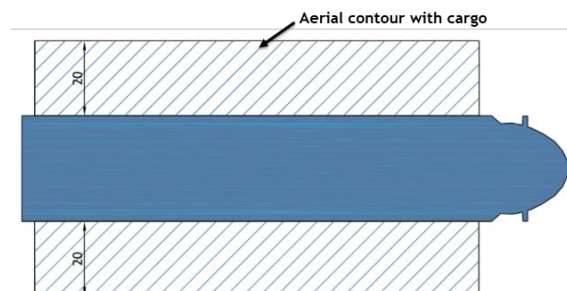


Figure 4 . Load arrangement schema

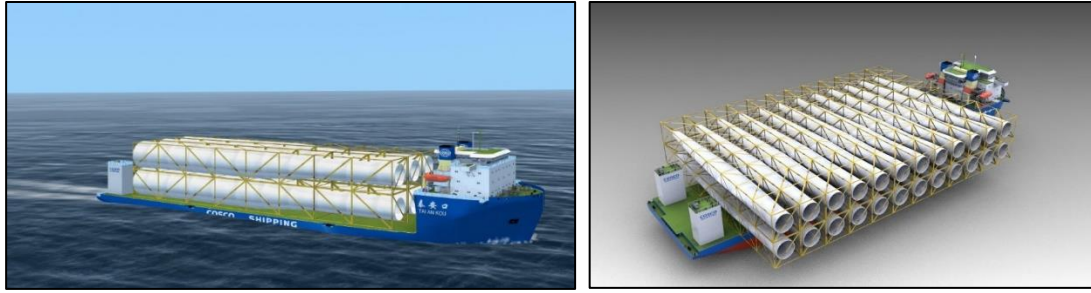


Figure 5 . Visual model of the heavy lift vessel in the real-time simulator

- Manoeuvring strategy: these vessels access the port without cargo onboard, and on the contrary, departures are with cargo, in both cases with the same draft. Manoeuvres are executed at high tide, minimizing the current effect, and therefore with only river discharge. Initially tugs are not connected, but available in case of necessity.

2.2.2 Concept design assessment

After all required data is collected (data of the navigation route (plans, bathymetry, AtoN, etc.), meteorological conditions (wind, waves and current-water levels) and the characteristics of the vessel(s) (dimensions, main characteristics, propulsion and steering equipment, loading arrangement)) an analysis based on PIANC methodology (report 121) or ROM 3.1-99 is proposed to evaluate the required navigable and aerial width in each area of the access channel. Previously, the fairway is divided into several sections: straight or curved, exposed or protected from the waves, swinging areas, etc.

Then, the required width in each section is obtained and the results are presented in a plan to graphically assess whether the spaces obtained from the evaluation are compatible with the available area. The critical areas or interference points are thus identified. The following sketches show an example where the solid and dashed red lines are the required navigation and aerial space, respectively. The green line refers to the available channel width and the orange line corresponds to the space necessary for possible towing assistance during the turn.

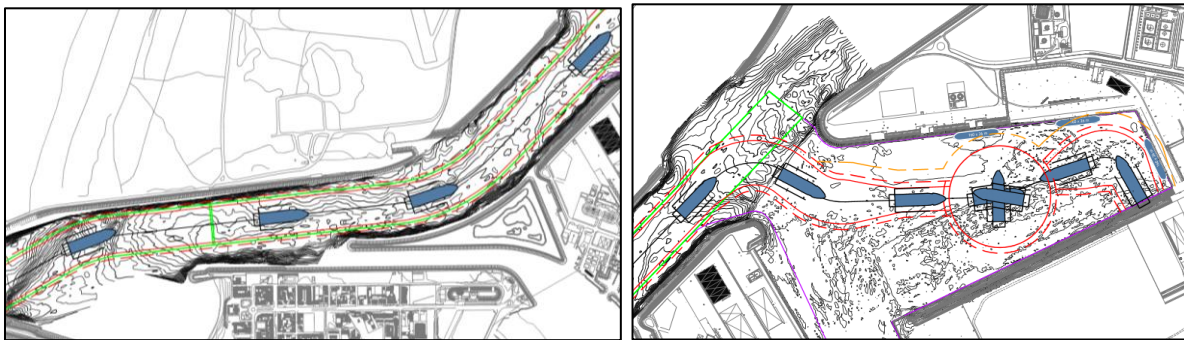


Figure 6 . Sketch of the required navigable and aerial space. PIANC concept design

The results obtained with this methodology allow to identify the critical areas that will be studied in more detail in following phases using more accurate tools.

2.2.3 Real-time manoeuvre simulator assessment

The use of the real-time manoeuvre simulator firstly requires creating the numerical and visual models of both the navigation area/port and the vessel(s). Then, information considered in the previous phase is used, and completed with more precise data. For the navigation area, photographs and satellite image and plans of the port area, detailed bathymetry data, time series of meteorological data (wind, current waves and water level) obtained from buoys or numerical climate models are used. For the vessel(s), in

addition to general arrangement and main characteristics (LOA, B, T and displacement), data on hydrodynamic behaviour, results of sea trials, engine and rudder response, etc. is considered.

The quality and reliability of the model highly depend on the quality and level of detail of the available information. Participation of local experts and stakeholders (local pilots, terminal operator, port and maritime authority, etc.) from initial steps facilitates reliability and realism.

Once the models of the port and vessels are created, the simulation matrix is defined based on the objectives of the project and approved by the agents involved (shipping companies, pilots, port authorities, operators and/or terminals) so that the simulations begin. As these are real-time manoeuvres, the duration of this phase will depend on the number of manoeuvres to be performed and the length of each one.

Because the simulator involves a higher cost (economic and time), to optimize simulation use it is usual to focus only on the most interesting scenarios.

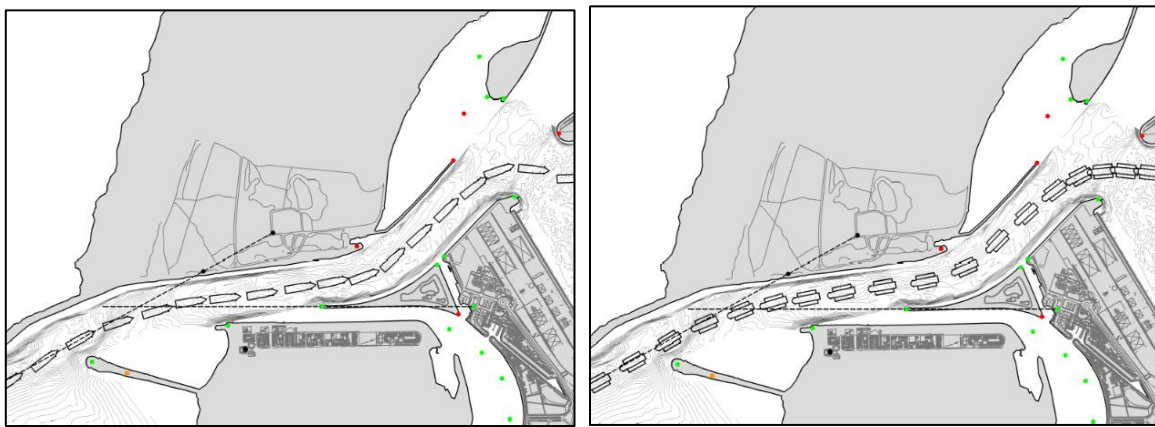


Figure 7 . Trackplots of an approach (left) and departure (right) manoeuvre performed in the real-time simulator

The assessment of the required navigable and aerial area associated with a selected risk level is carried out by applying the methodology included in PIANC report 121 and ROM 3.1-99 in relation to the detailed analysis. A probabilistic analysis of occupied spaces is carried out based on the envelope of repeated manoeuvres, performed under the same conditions (vessel and climate scenario) and following a similar strategy. The number of repeated manoeuvres must be a sufficiently significant sample to be able to consider valid the statistical results. The methodology establishes that the repetition of 8 manoeuvres is enough for reliable results.

The results are extrapolated spaces (associated with a certain exceedance probability plus a confidence interval) that allow to assess whether the available space is adequate, or interferences exist with port elements or shallow areas. The dimensions of the maximum vessel that can safely access or the identification of areas to be dredged can be defined based on these results. It also allows to assess the required aerial space (green line in the following figures) and possible interferences with superstructure. As a result, additional margins to singular points (docked ships, dredging limits, structures, etc.) can be evaluated.

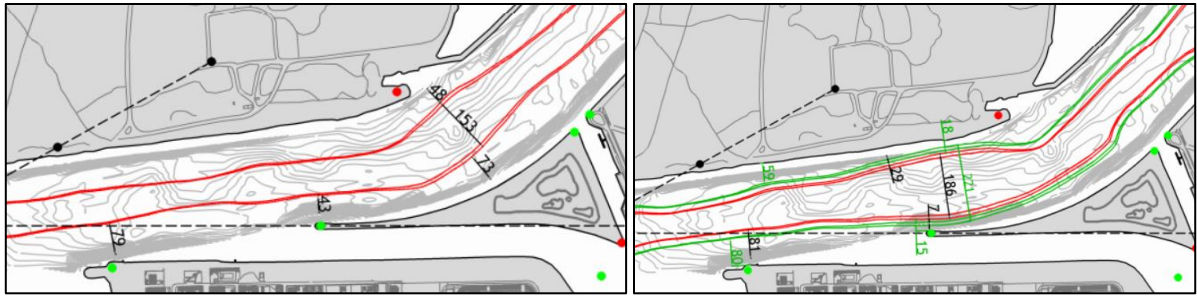


Figure 8 . Required navigable area (red line) and aerial space (green line) for approaches(left) and departures (right) obtained from the statistical analysis

2.2.4 Participation of local Pilots

The participation of local Pilots (experts in navigation in the area: local conditions, strategies, critical points, and other factors affecting the vessel) from the beginning is in many cases essential for the success of the project.

Initial interview to collect information on local conditions, strategies, local phenomena is useful for engineers, as well as for the creation and calibration of the model (numerical and visual). Their assistance highly improves the realism and accuracy of the project.

After detailed assessment of navigable areas is performed, Pilots sessions in the simulator are arranged to share main conclusions and results, allowing the Pilots to become familiar with the manoeuvres of new traffic and to train new strategies before manoeuvres are carried out in reality.

3. Conclusions

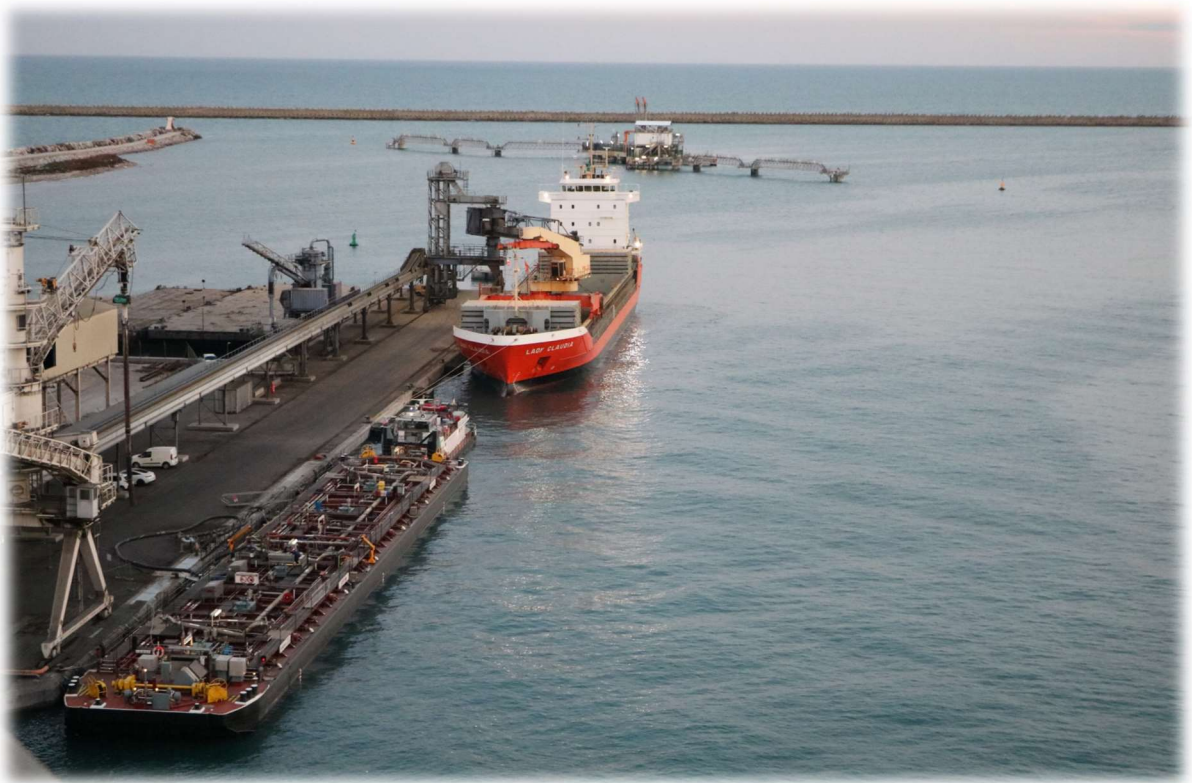
The development of offshore wind industry is associated with the maritime transport of large pieces. Then, the naval industry, maritime transport and ports and fairways must be able to meet the growing demand, and at the same time guarantee high quality and adequate safety levels.

Therefore, the feasibility of this type of operations must be analysed. The use of precise numerical tools, such as real-time manoeuvre simulators, allows to assess the feasibility of these operations and to define safe access conditions. Additionally, the use of simulators allows the Pilots and/or Captains to become familiar with these specific operations in the port considering local restrictions.

It is also possible to carry out preliminary assessment in early stages of the project applying concept design methodology to identify the critical points or evaluate alternatives quickly and reliably.

4. References

- [1] PIANC (1997). Approach Channels. A Guide for Design
- [2] PIANC (2014). Harbour Approach Channels Design Guidelines
- [3] Spanish Port Authority Guidelines (ROM 3.1-99) “Maritime Recommendations for the Design of Port Access and Manoeuvring Areas”



Ref. Author : Vasileios Afentoulis – Suez Consulting - vasileios.afentoulis@suez.com
650 Rue Henri Becquerel, 34000 Montpellier, France

Co-authors :

Julien Rivemale – Suez Consulting - julien.rivemale@suez.com

650 Rue Henri Becquerel, 34000 Montpellier, France

Jean-Yves Battesti – CCI de la Corse - jean-yves.battesti@sudcorse.cci.fr

Quai l'Herminier, 20000 Ajaccio, France

Performance-based design of berthing/mooring dolphin structure considering geotechnical and structural constraints under offshore load conditions

A number of terminals have been extended through the use of berthing and/or mooring dolphins aligned with the existing berth structures. These dolphins allow larger ships to safely moor at the berth. They serve to counteract mooring loads from mooring lines and fenders, restrict the motion of the moored ship, increase the available fender contact length, and absorb part or all of the berthing energy, thus protecting the existing harbor structures. Regarding the design techniques for berthing dolphins, the yield limit has been approached more optimally over the years to make better use of the load-bearing capacity of the dolphins. The present study aims to provide a better understanding of the application of available design methods in engineering practice. This study is conducted within the context of the project assessing the reinforcement of existing harbor facilities and the extension of the “Mole Croisière” cruise berth in Ajaccio, France. The project involves the addition of a berthing dolphin structure located at the end of the existing berth. The optimal design of the dolphin structure was achieved using advanced numerical modeling techniques. These techniques were applied to the structural analysis of the dolphin-fender system, the interaction between the dolphin and the soil it is embedded in, and the fully dynamic mooring analysis. The mooring analysis was used to assess the mooring loads for several design ships under various wind, wave, and current conditions at the site. Several technical aspects were evaluated. The primary structural design challenge was related to the limited load-bearing capacity of the pile foundation at the seabed level, in a water depth ranging from 20 to 30 meters. The optimization of the dolphin structure design was carried out by employing rock-socketed foundation piles embedded in the seabed. Additionally, X-tie-braces were installed at the mid-height of the dolphin's piles to transform bending moments into axial forces (compression and tension exerted on the steel bracing system). A predetermined displacement for the dolphin was set, along with a desired fender performance, to achieve the desired energy absorption capacity of the quasi-flexible system.

1. Introduction and aims

The berthing and mooring processes are vital operations in maritime and naval activities, necessitating high-capacity, functional, and secure infrastructures to meet current needs and address the growing demands of global maritime transport. As ship dimensions have continued to increase over time, specialized terminals and equipment have been developed to handle specific types of high-tonnage vessels, including containers, cruise ships, tankers, and roll-on/roll-off vessels. In most port terminals, traditional berthing and mooring methods involve the use of docks, wharfs, jetties, or piers equipped with fenders and bollards to facilitate the berthing maneuvers of vessels. However, existing berthing facilities often face challenges in accommodating large vessels due to constraints related to draft limitations and low structural load-bearing capacity. In response to this, alternative configurations can be designed, such as incorporating discontinuous berths or combining berths with dolphin structures to create a unified mooring and berthing line ([1], [2], [3]). A dolphin can serve as either an isolated marine structure or as part of a system, with multiple dolphins aligned or following the ship layout. Dolphin structures have the potential to function as additional protective hardpoints, aimed at increasing the berthing capacity of a port and redistributing the total applied ship-induced loads. Based on this concept, the Port of Ajaccio in Corsica is currently planning to extend their cruise berth, known as 'Môle Croisière,' by installing an additional berthing/mooring dolphin structure at the end of the existing berth. This project aims to achieve three primary goals: 1) To secure the berthing of large vessels by increasing the supporting surface through the construction of the dolphin; 2) To enhance the mooring capabilities of these vessels by adding additional mooring points, particularly through the installation of a 50-ton capacity mooring bollard and a capstan; 3) To reinforce the safety of passenger embarkation and disembarkation at the Cruise Terminal by ensuring a continuous flow between the Terminal and the water structures. This will be achieved, notably, through the construction of a bridge connecting the Terminal to the dolphin. The purpose of this paper is to present conceptual solutions and provide an overview of the conducted analyses.

1.1 Study area

Môle Croisière is situated on the south-western side of Ajaccio Port, France. The structure has a width of 20 m and is aligned at 106°N / 286°N. It consists of a solid blockwork wall stretching 60 m at the western end, while the eastern end features an open-piled quay that spans 188 m. The berth is elevated at +2.8 m. Adjacent to the eastern end of the berth, there are two mooring dolphins supported by piles, measuring 13.6 m in width and 6.4 m in depth, interconnected by walkways. Further to the east of the outer mooring dolphin, there is a mooring buoy connected to a sinker on the seabed via a chain and auxiliary buoy. The port basin is characterized by prominent granite-type rock formations. Figure 1 depicts the proposed structure's location, overlaid with bathymetry contours.

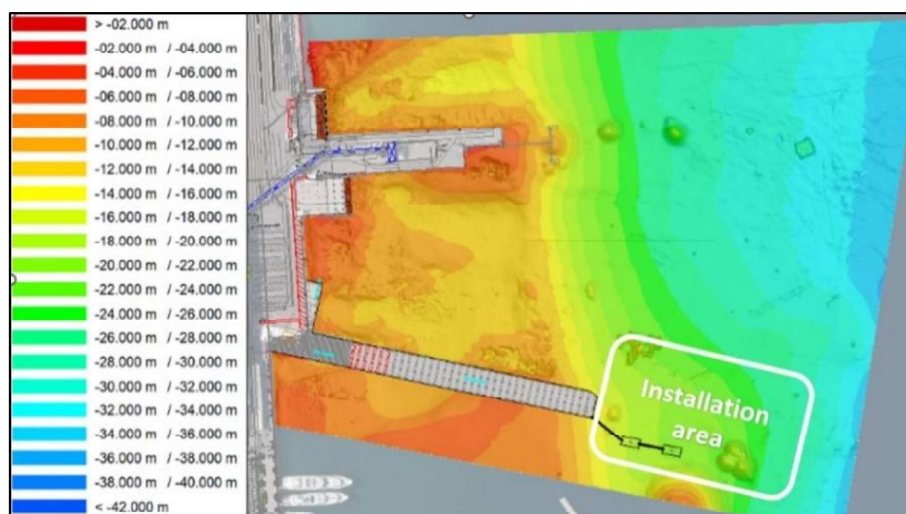


Figure 1 : Projected structure's location, superimposed with bathymetry contours.

The conception and construction of the dolphin had to fulfill numerous constraints and objectives, including minimizing environmental impact, facilitating access to the dolphin through auxiliary structures, ensuring construction and phasing feasibility, meeting structural design requirements, addressing geotechnical constraints, considering environmental factors such as wind and hydrodynamic loads, taking into account local depths and required draft. Additionally, the project aimed to enhance the port's capacity in terms of accommodating a greater number of vessels. Therefore, the location and altimetry of the dolphin needed to be adjusted to effectively cater to the widely varying principal dimensions and side door positions of each cruise ship.

1.2 Environmental conditions

ACTIMAR (2022) [4] showed that the prevailing winds on the west of Corsica are from the north-east, with occasional strong winds from the south-west. Stronger winds are most consistent during the winter months although instances of high winds can be observed at various times throughout the year. The maximum windspeeds documented was 15 m/s.

The prevailing wave conditions in Ajaccio can vary depending on the season and weather patterns. Generally, the region experiences calm to moderate wave conditions, with occasional larger swells during certain times of the year. ACTIMAR (2022) showed incident wave directions of approximately 125°N to 140°N, while significant wave heights can reach values of about 1.2m for the 10-year return period, associated with wave peak periods between 4 s to 15 s. The design site water levels (considering an adjustment for sea level rise) are shown in the Table below.

Parameter	Height above datum (m)
Highest Astronomical Tide Level	+0.7
Mean High Water	+0.47
Lowest Astronomical Tide	+0.21

Table 1 Water levels in Ajaccio, France (Shom, 2019).

1.3 Soil characteristics

The nature and characteristics of the soil investigated through pressuremeter tests across the site are as follows: Greyish sandy silts were identified, reaching a depth ranging from -20.3 m to -23.7 m below the chart datum (mCD). Below the greyish sandy silts, granitic arenas followed by fractured granite were identified, extending to a depth between -21.6 m and -25.6 m below the chart datum (mCD). Additionally, geotechnical surveys revealed the presence of granite bedrock, which extends to a depth ranging from -26.6 m to -29.6 m below the chart datum (mCD). The geological material properties are presented in Table 2.

Geologic materials	Ménard Rheological coefficient (α)	Pressuremeter modulus (E_M)	Pressuremeter net limit creep pressure (pl^*)	Pressuremeter net limit pressure (pl^*)
Greyish sandy silts (-16,2 to -19,5 mCD)	0.33	1.8	0.22	0.30
Granitic arenas (-20,3 to -26,4 mCD)	0.66	184	3.00	3.00
Granite bedrock (-26.8 mCD)	0.50	600	5.00	5.00

Table 2 Soil properties obtained by pressuremeter tests.

2. Conceptual design

The proposed dolphin comprises a platform supported by 15 piles. Figure 2 offers a top view of the projected structures, showcasing the essential geometric characteristics and layout of the dolphin. Further details regarding the piles' geometry and foundation are depicted in Figure 3. For optimal support during mooring and berthing processes, the dolphin structure was meticulously designed with specific dimensions: a length of 20 meters and a width of 10 meters, with a platform elevation of +2.80 meters above datum. These measurements were carefully chosen to accommodate the needs of berthing 20 high-tonnage cruise ships effectively. The planned location for the dolphin is set to be 30 meters seaward from the end of the existing berth. To provide access to the structure, an auxiliary bridge was conceptualized.

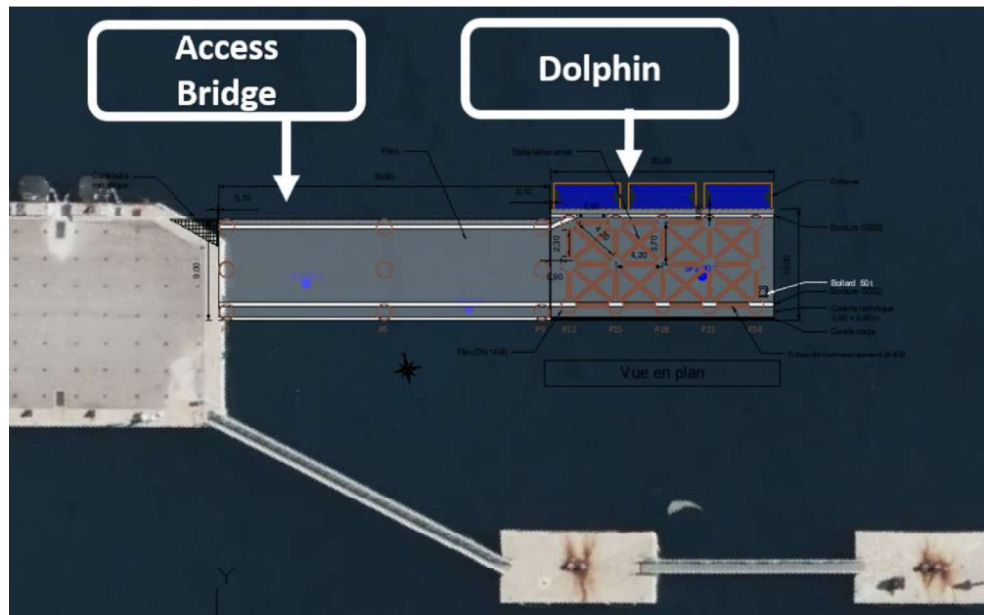


Figure 2 : Projected structure's location, superimposed with bathymetry contours.

To ensure the dolphin's optimal bearing capacity, a novel design was proposed and validated through comprehensive 3D numerical analyses, as described below. The construction of the dolphin will involve using tubular steel piles, with a diameter of 1400mm and a thickness ranging from 30 to 36mm. To address the specific site foundation and construction constraints, two distinct design schemes were meticulously chosen.

Under the first scheme, rock-socketed foundation piles will be utilized, filled with concrete along a 6-meter length, with 3 meters extending below and above the interface between the bedrock and the soft bottom (see Figure 3). To bolster stability further, X-tie-braces will be integrated at the mid-height of the dolphin's piles. This addition will effectively reduce displacements and mitigate bending moments along the piles, ensuring enhanced structural integrity. The superstructure comprises a concrete slab with a thickness of 2 meters.

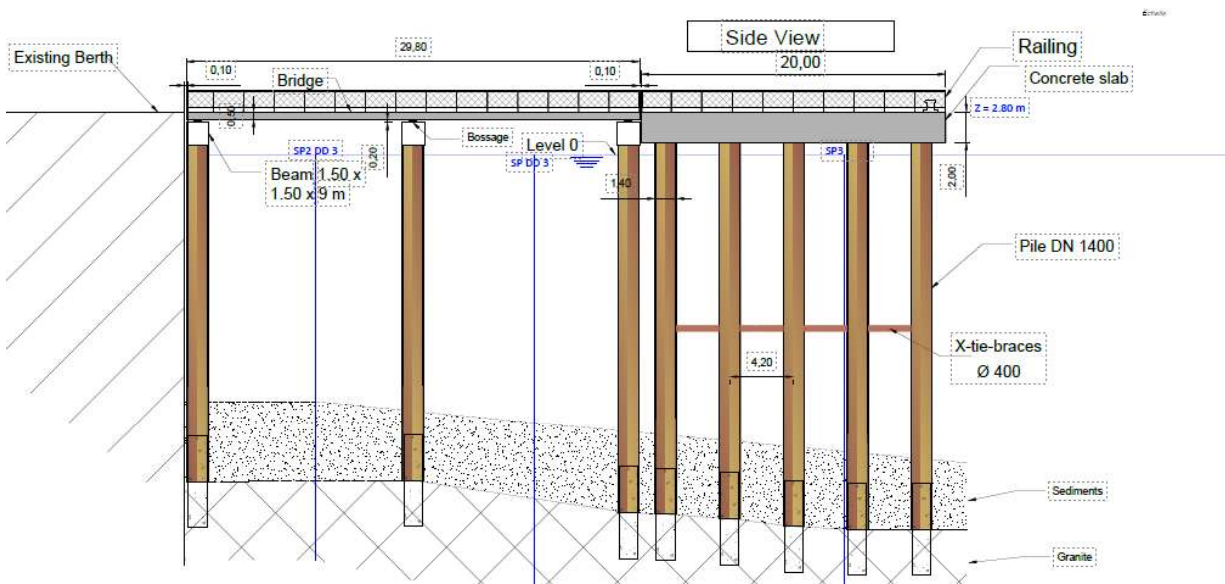


Figure 3 : Longitudinal section of bridge and dolphin structure.

Contrasting the first scheme, the second scheme involves incorporating a group of four micro-piles for each main pile. These micro-piles, measuring 250mm in diameter, will reinforce the main piles and allow for penetration into the rock layer. Each micro-pile will be drilled 3 meters into the bedrock while extending an additional 3 meters upward within the main pile (see Figure 4). Notably, for this configuration no tie-braces were considered. The advantages of this scheme lie in its ability to provide adequate support while minimizing additional components. Furthermore, a more flexible superstructure/platform was implemented to complement the overall design. The superstructure consists of a 300mm concrete slab supported by beams measuring 1.2 meters in width and 2.0 meters in height. This thoughtful configuration enables displacements in the head of the structure, which in turn significantly reduces bending moments in the toe of the piles.

3. Calculations and numerical simulations

The numerical analyses were conducted using Autodesk Robot Structural Analysis (FEM) Professional v2022 software [5]. The two distinct design schemes underwent analysis while considering various designed loads, including dead loads, live loads, berthing forces, mooring conditions, hydrodynamic forces, moving loads (a 60-ton truck crane was considered), thermal loads, and construction loads. Furthermore, the potential effects of corrosion were also taken into consideration. To model the elastic behavior of the soil surrounding the piles, we defined supports with horizontal elasticities corresponding to the specific soil properties.

The structural design was meticulously executed following Eurocode standards, carefully considering action safety factors and load combinations. Special care was taken to ensure that the load combinations used in the analysis accurately represented ‘real’ scenarios. For this purpose, we thoroughly assessed various load combinations to capture the most realistic conditions that the structure may encounter during its operational life. To exemplify, we intentionally avoided combining

berthing and mooring loads simultaneously in the analysis. Consequently, a total of 83 load cases were thoughtfully considered to encompass a wide range of potential operational scenarios.

The berthing loads were calculated following the guidelines set forth by PIANC (2002) [6], taking into consideration no tug assistance. The design ship's characteristics used for this computation were as follows: length of 361m, width of 47m, height of 65m, and a displacement of 106,946 tons. The total berthing load was determined through the assessment of fender reaction resulting from the kinetic berthing energy, ultimately amounting to 4075 kilonewtons. This load stands as one of the most critical design parameters, as it encompasses the forces that the dolphin must withstand during berthing operations.

It is worth emphasizing that, in this conceptual design phase, we have intentionally chosen not to approach the structure's yield limit ([7], [8], [9]). This decision is driven by the understanding that the projected dolphin structure serves a multifunctional purpose beyond merely absorbing ship kinetic energy. In addition to that, it will be responsible for accommodating passengers, vehicles, trucks, and construction engines. Consequently, to ensure safe and efficient functioning, significant displacements, typically associated with high elastic structure's behavior, are not allowed. Thus, by maintaining structural rigidity and minimizing excessive deformations, we can guarantee the dolphin's ability to fulfill its various roles effectively and with enhanced reliability.

The results obtained from the 3D Finite Element Method (FEM) analysis for each geometrical configuration/scheme were compared to identify the most suitable solution that best aligns with the technical project constraints. Figures 4 and 5 illustrate the maximum calculated deflections in the two horizontal directions (U_x , U_y) at the top of the structure under a load case combining the effects of dead, live, berthing, and thermal loads.

Notably, the maximum computed deflections for scheme 2 are significantly higher ($U_{max} \sim 53$ cm), whereas scheme 1 exhibits much lower deflections ($U_{max} \sim 3$ cm). These numerical findings indicate that scheme 1 presents a more rigid structural system. This enhanced rigidity can be attributed to the X-tie braces, which effectively constrain lateral displacements, and the presence of a thicker superstructure with a width of 2 meters, effectively limiting deflections at the top.

Regarding the foundation solution for schemes 1 and 2, the implementation of a 4-micropile group (in scheme 2) was found to be inadequate in supporting the applied loads, which significantly exceeded the bearing capacity of the 250mm diameter micropiles. The micropiles' elastic critical moment ($M_{cr} \sim 190$ KNm) and plastic shear resistance ($V_{pLRd} \sim 1640$ kN) were lower than the corresponding maximum design bending moment ($M_{ed\ max} = 5530$ KNm) and shear force ($V_{ed\ max} = 7068$ kN).

In contrast, the 1220mm foundation rock-socketed piles of scheme 1, drilled into the granitic bedrock, are associated with higher values of resistance, an elastic critical moment M_{cr} of about 8390 KNm and a plastic shear resistance V_{pLRd} of 8111 kN, which are sufficient to withstand the design loads.

In conclusion, the geometrical configuration of scheme 1 offers superior structural stability and performance compared to scheme 2, meeting the project's technical requirements more effectively.

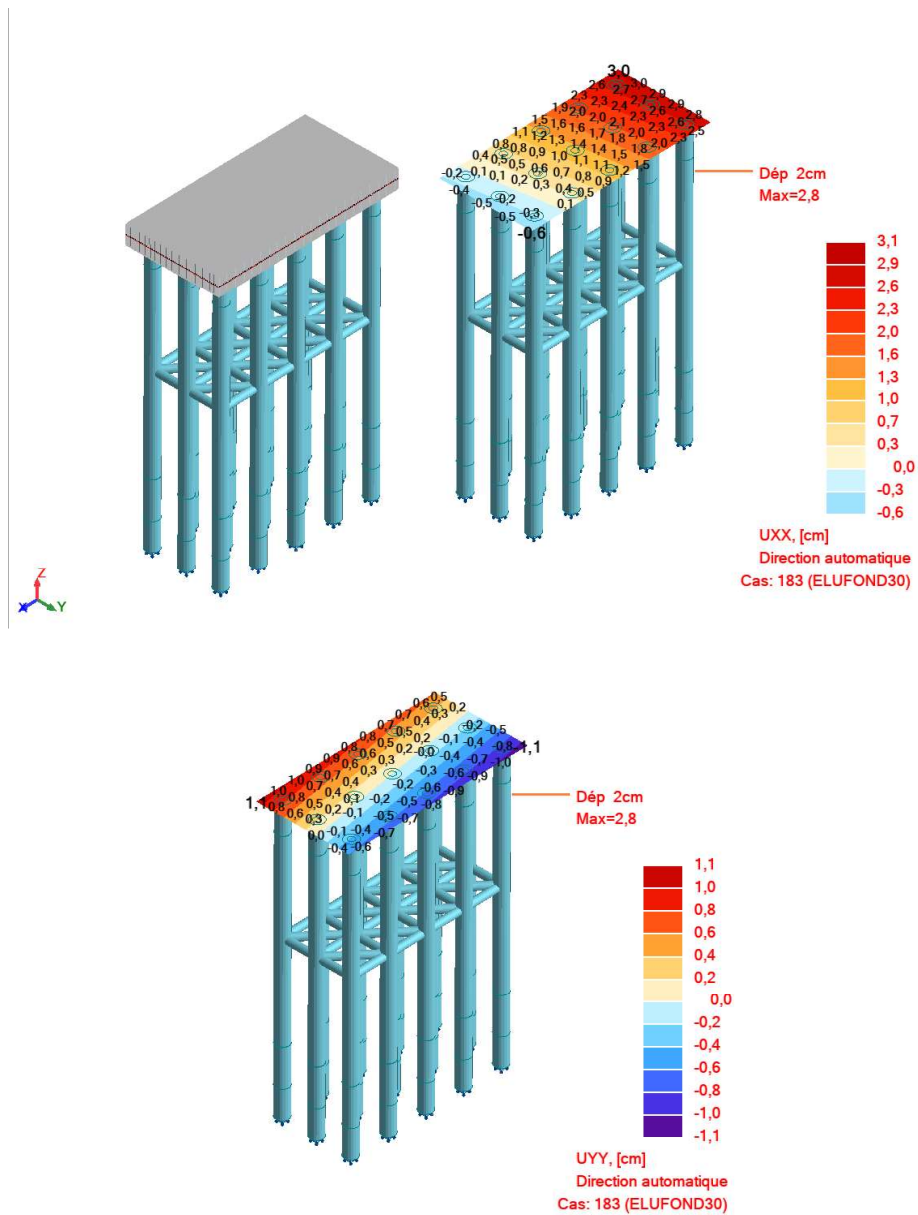


Figure 4 : Scheme 1- Initial unloaded state (up-right) and Maximum deflections at the top of breasting dolphin in x direction (up-left) and y direction (down).

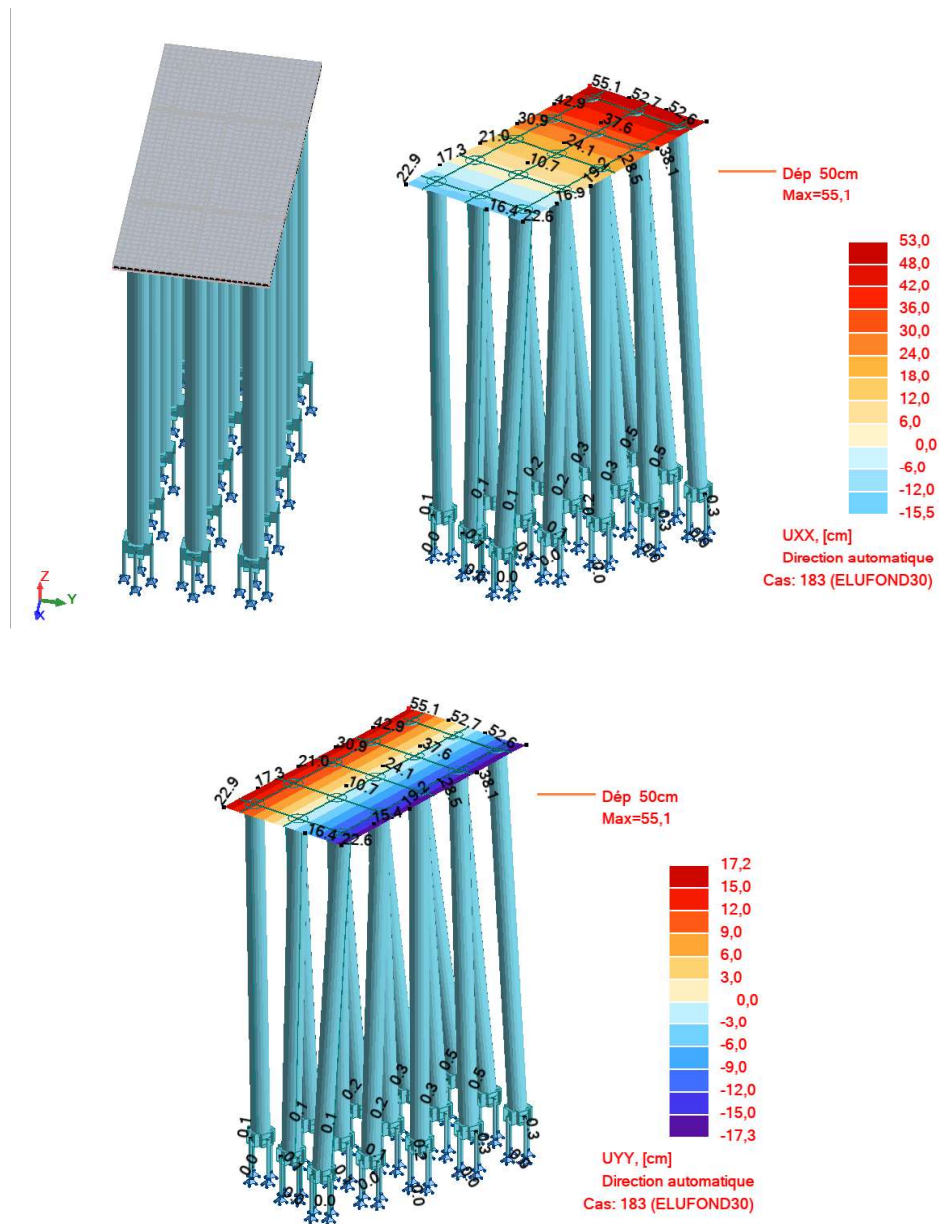


Figure 5 : Scheme 2- Initial unloaded state (up-right) and Maximum deflections at the top of breasting dolphin in x direction (up-left) and y direction (down).

4. Conclusions and perspectives

In conclusion, the study underscores the critical significance of optimizing dolphin design to effectively meet the future berthing and mooring requirements. The environmental conditions in the study area, such as prevailing winds and wave patterns, were thoroughly considered to ensure the feasibility of the design. Extensive analyses of geotechnical constraints, soil characteristics, and foundation options were conducted to enhance the accuracy of the dolphin's performance while minimizing its environmental impact. The conceptual design of the dolphin involved a platform supported by 15 piles, and two carefully selected design schemes were subjected to detailed 3D numerical simulations for performance comparison. Scheme 1, incorporating rock-socketed foundation piles and X-tie-braces, exhibited superior structural stability and reduced deflections in comparison to scheme 2, making it the more suitable solution. The structural design adheres to Eurocode standards and takes into account various load combinations, ensuring the dolphin's efficiency without approaching yield limits. These comprehensive analyses and findings contribute significantly to the successful design and implementation of the dolphin structure at the Port of Ajaccio, Corsica. For future research, additional schemes can be explored and implemented to further enhance the effectiveness of the dolphin's design and overall port capacity.

5. References

1. Velkavrh, B., Boštjan, P., and Battelino, L., 2019. Design of Ro-Ro berth breasting dolphin pile foundation in the port of Koper. Proceedings of the XVII ECSMGE-2019. doi:10.32075/17ECSMGE-2019-0089
2. Roubos, A., Focks, D.J.J. and Peters, D.J., 2016. Innovation flexible dolphins by full scale field test laterally loaded tubular piles. In 9th PIANC-COPEDEC 2016 Conference: ANTAQ/ECLAC/PIANC Workshop. PIANC.
3. Krivokapic A., Sjöstedt H., 2016. Design of protective dolphins in difficult geotechnical conditions. Proceedings of Nordic Geotechnical Meeting, Reykjavik May 28, 2016
4. ACTIMAR, 2022. Synthèse des données océaniques et météorologiques au port d'Ajaccio.
5. Marsh, K., 2014. Autodesk® Robot Structural Analysis Professional-2015: Essentials. Marsh API, LLC.
6. PIANC, 2002. Guidelines for the design of fender systems. Report of Working Group 33 of the Maritime Navigation Commission.
7. Grabe, J., 2012. Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways EAU 2012, 9th edition, Hamburg, Germany, ISBN 978-3-433-03110-0
8. Feygin, V., 2015. Design of semi-flexible and flexible dolphins with concrete pile caps. Global J. Res. Eng, 15(1-E), pp.1-22.
9. Magda, W., 2019. Elastic Fender-Dolphin Interaction for Economic Design of Berthing Dolphins. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 145(3), p.04019007.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

Auteur principal : Gallala – Abir – abir.gallala@arcelormittal.com – ArcelorMittal Sheet Piling – 66, rue de Luxembourg L-4221 Esch sur Alzette – Luxembourg

Co-auteurs : Hilbert – Thomas – thomas.hilbert@arcelormittal.com – ArcelorMittal GLOBAL R&D — 66, rue de Luxembourg L-4221 Esch sur Alzette – Luxembourg

Key words : Steel Sheet Piles, SmartSheetPile, Health monitoring system

SmartSheetPile: A Health Monitoring System for Waterway Infrastructures

Résumé: Dans un monde en constante évolution, la gestion efficace des infrastructures revêt une importance cruciale pour la sécurité, la durabilité et les performances optimales des installations critiques telles que les ports et les voies fluviales. Avec la croissance continue du commerce maritime, la demande en solutions innovantes pour surveiller et protéger ces infrastructures est de plus en plus évidente. Cet article présente SmartSheetPile, un système de surveillance de la santé des infrastructures développé par ArcelorMittal Palplanches, conçu pour renforcer la sécurité et la réactivité environnementale.

SmartSheetPile intègre des capteurs à la pointe de la technologie avec une analyse de données basée sur l'Intelligence Artificielle, créant un système de surveillance en temps réel et un système d'alerte préventive. En assimilant facilement les données dans un jumeau numérique, il comprend de manière exhaustive la performance d'une structure, facilitant une gestion efficace des actifs. De plus, en fusionnant ces données avec d'autres sources telles que des données satellitaires ou environnementales externes, il révèle des potentiels cachés et des vulnérabilités, augmentant ainsi les rendements du projet et prolongeant la durée de vie de la structure. La sécurité est renforcée grâce à des mesures proactives de prévention des dommages et de détection précoce, réduisant considérablement les temps d'arrêt, les coûts et les désagréments. Avec SmartSheetPile, la réalisation d'une maintenance préventive et prédictive devient simple, éliminant le besoin d'inspections coûteuses et de réparations inattendues. Il sert de passerelle vers un environnement construit plus sûr, plus efficace et plus résilient.

L'article détaille les capacités de SmartSheetPile, son alignement avec les objectifs de l'industrie et son potentiel pour transformer la résilience et la durabilité des infrastructures. De plus, il présente un démonstrateur comprenant une gamme complète de capteurs et un tableau de bord hébergé sur le cloud, permettant une visualisation efficace des données et une aide à la décision.

Abstract: In the ever-evolving landscape of infrastructure management, ensuring the safety, sustainability and optimal performance of critical facilities like ports and inland waterways is of paramount importance. With the continued growth of maritime trade, the demand for innovative solutions to monitor and safeguard these infrastructures has become increasingly evident. This paper introduces SmartSheetPile, a health monitoring system developed by ArcelorMittal Sheet Piling, designed to enhance safety, digital awareness, and environmental responsiveness.

SmartSheetPile seamlessly integrates cutting-edge sensor technology with AI-driven data analysis, creating a real-time monitoring and preemptive alert system. By effortlessly assimilating data into a digital twin, it comprehensively understands a structure's performance,



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

facilitating efficient asset management. Furthermore, by amalgamating this data with other sources such as satellite or external environmental data, it uncovers hidden potentials and vulnerabilities, thereby increasing project returns and extending the structure's lifespan. Security is further strengthened through proactive damage prevention and early detection measures, significantly reducing downtime, costs, and inconvenience. With SmartSheetPile, achieving preventive and predictive maintenance becomes straightforward, eliminating the need for expensive inspections and unexpected repairs. It serves as the gateway to a safer, more efficient, and resilient built environment.

This paper delves into the detailed capabilities of SmartSheetPile, its alignment with industry objectives, and its potential to revolutionize infrastructure resilience and sustainability. Furthermore, it highlights a demonstrator featuring a comprehensive array of sensors and a cloud-based dashboard, enabling effective data visualization and decision support.

1. Introduction

In today's rapidly evolving world, the management and upkeep of critical infrastructures, such as ports and inland waterways, stand as vital components of our global connectivity and economic prosperity. The continued expansion of maritime trade highlights the growing need for innovative solutions that not only ensure the safety and sustainability of these essential facilities but also optimize their performance. In this context, the introduction of SmartSheetPile, a pioneering structural health monitoring system developed by ArcelorMittal Sheet Piling, emerges as a significant milestone.

SmartSheetPile is foremost a guardian of structural integrity, aiming to secure these infrastructures against potential threats and vulnerabilities. Simultaneously, it strives to minimize unavailability, ensuring that these facilities remain operational and accessible when needed most. Through its robust capabilities, SmartSheetPile not only detects structural issues but also enables a preventive and predictive maintenance, preemptively addressing concerns before they escalate.

SmartSheetPile combines state-of-the-art sensor technology with cloud-based data analysis to create a real-time monitoring system. By equipping sheet piles with a network of strategically placed sensors, SmartSheetPile acquires essential data concerning critical facets of infrastructure integrity. This encompasses variables like corrosion progression, water level fluctuations, deformation, inclination, strain, and bollards conditions. This data is subsequently transmitted to a cloud-based platform, where it undergoes rigorous filtering and analysis, facilitating the development of a digital twin model for the monitored infrastructure. Moreover, when coupled with external data sources such as satellite information, AI-based algorithms can forecast impending operational or environmental issues, subsequently initiating timely alerts.

2. Health Monitoring System for infrastructure

Health monitoring systems have become indispensable tools in modern infrastructure management, providing valuable insights into the condition, performance, and integrity of structures. These systems enable proactive maintenance, early detection of issues, and informed decision-making for optimal resource allocation. In the context of port and waterway structures, health monitoring systems have gained significant attention due to the critical nature of these assets.

In the report (1) published by the PIANC (World Association for Waterborne Transport Infrastructure) Working Group on Health Monitoring for Port and Waterway Structures, the importance of implementing effective health monitoring systems was highlighted. The report emphasized the need for

comprehensive and integrated solutions to monitor the structural health of port infrastructure and recommended the utilization of advanced technologies and data-driven approaches. Figure.1 from the report provides an overview of a conventional health monitoring system.

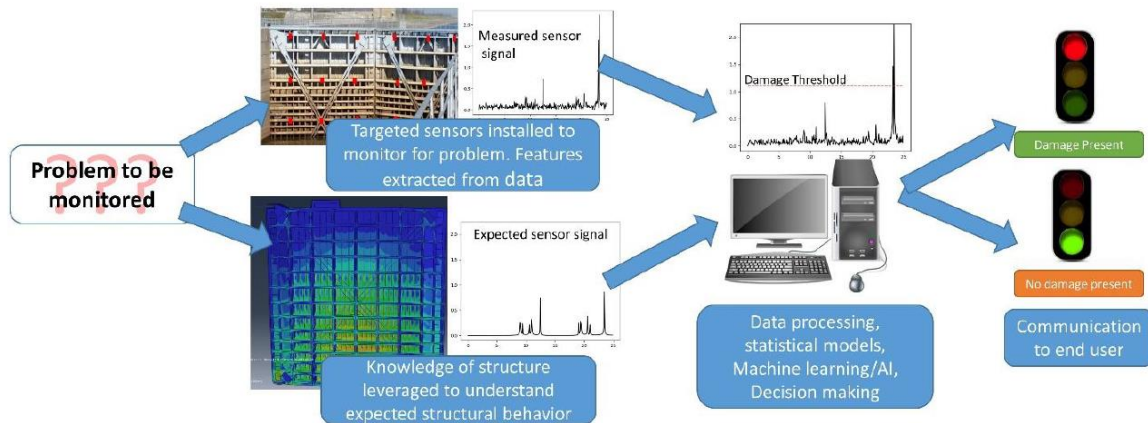


Figure 1: Overview of a Health Monitoring System (1).

The primary objective of an effective structural health monitoring program can be distilled into four key questions:

1. Is there any damage?
2. What is the precise location of the damage?
3. To what extent does the damage exist?
4. How much remaining service life does the structure have before safety concerns arise?

SmartSheetPile integrates state-of-the-art sensor technology, cloud-based data analysis, and digital twin modeling to provide a holistic and real-time monitoring solution for port infrastructure. Its capabilities align with the key objectives outlined in the PIANC working group's report, including continuous monitoring, early detection of structural issues, and predictive maintenance. By integrating advanced health monitoring systems like SmartSheetPile, port authorities can leverage the power of data-driven decision-making and proactive maintenance strategies, leading to enhanced infrastructure resilience, optimized resource allocation, and improved long-term sustainability of port and waterway structures.

SmartSheetPile embodies the principles of such systems by continuously monitoring the health of infrastructures and providing real-time data insights to stakeholders. For example, corrosion represents a significant concern in maritime environments, leading to structural deterioration and compromising the integrity of port infrastructure. With SmartSheetPile, corrosion levels can be continuously monitored and analyzed, allowing for timely intervention and maintenance to prevent further damage.

3. SmartSheetPile as a solution

3.1 System overview

SmartSheetPile stands as a comprehensive solution with a multifaceted mission. Its primary objective is to secure critical structures by preventing irreparable damage, swiftly detecting operational and environmental damage, and providing early warnings of potential catastrophic collapses. Beyond this, it seeks to minimize unavailability, ensuring that unexpected shutdowns are avoided, costs are saved,



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

and disruptions to users are limited. Achieving preventive and predictive maintenance is another core function, offering insights into when and where maintenance is needed while eliminating the need for costly inspections and unscheduled repairs.

Furthermore, SmartSheetPile spearheads the digital transformation by seamlessly integrating collected data into the digital twin of the structure. This empowers stakeholders with a multi-dimensional overview of the structure's performance and its interactions with the surrounding environment, facilitating effective asset management.

Moreover, this innovative system excels in revealing hidden capacities and detecting weak spots by collecting precise data on structural health. This data enables the optimization of the structure's usage, unleashing its full potential, and subsequently improving project returns while extending its lifetime. In essence, SmartSheetPile not only safeguards infrastructure but also enhances its performance and longevity, aligning it with the demands of the modern world.

The SmartSheetPile solution consists of a modular system combining different types of sensors, data acquisition and storage systems, as well as information processing and analysis. The implementation of this solution begins with the selection of the sensors needed to analyze the targeted parameters (corrosion, deformation, vibration, etc.). The sensor installation areas are then defined according to the specific features of the structure (sheet pile length, quay wall length, type of sheet pile). This step leads to the selection of the required sensor protections.

The acquisition system consists of a central unit that collects data from nearby sensors (within a 30-meter radius). Sensors located further away transmit their data to autonomous measurement nodes that communicate via a wireless network.

When it comes to energy management, there are three possible solutions. A very low-power system can be battery-powered (replacement after 5 to 10 years will be necessary, depending on the type of measurements and their frequency rate), a battery-powered system recharged by photovoltaic panels, and finally a wired power supply if a power grid is available nearby.

Data management takes place in several stages. Initial local storage and basic pre-processing are carried out by the acquisition system. When a usable quantity of data has been recorded, a complete block is transmitted to a cloud platform via mobile networks or a wired connection. The final stage consists of analyzing and displaying the raw or processed data.

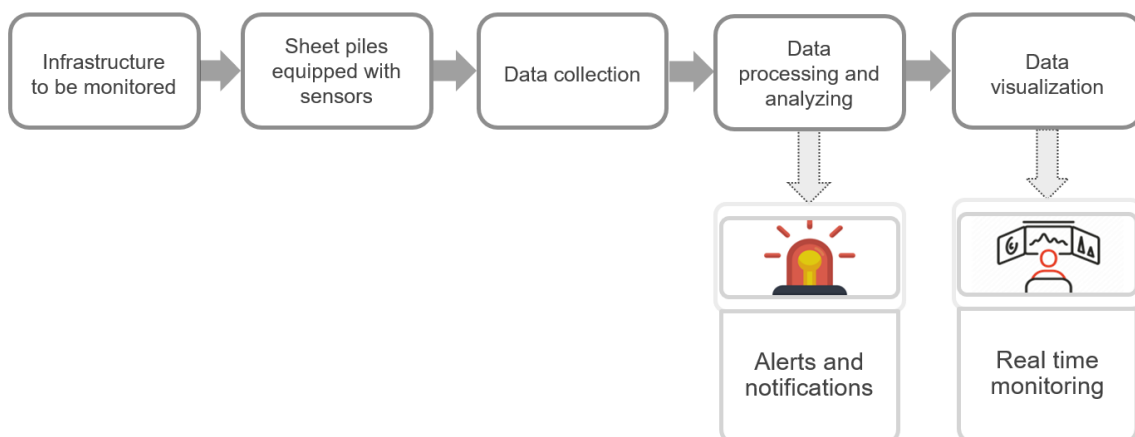


Figure 2: SmartSheetPile general overview

The added value of the SmartSheetPile solution is manifold. Infrastructures are secured thanks to real-time remote monitoring, and reduced downtime due to repairs. In addition, the solution reveals infrastructure capabilities and identifies weak points. Finally, thanks to digitalization, the reliability and performance of sheet piling products can be continually improved.

3.2 System description

A typical case of instrumentation for a sheet pile quay wall involves corrosion sensors (using electrical resistivity or ultrasonic measurements), deformation sensors (strain gauges), measuring the inclination of the product using an inclinometer, detecting shocks using accelerometers, measuring water levels and soil pressure (using piezoelectric pressure sensors) and common environmental parameters such as temperature.

After selecting the sensors and determining their locations, they are assembled into designated protective enclosures based on their types, safeguarded by robust, heavy-duty housings. Wiring is carried out via steel tubes to protect them from the environmental factors during both the pile-driving phase and the entire lifespan of the product. Each smart sheet pile can be equipped with several measuring units on both the water-facing and ground-facing sides.

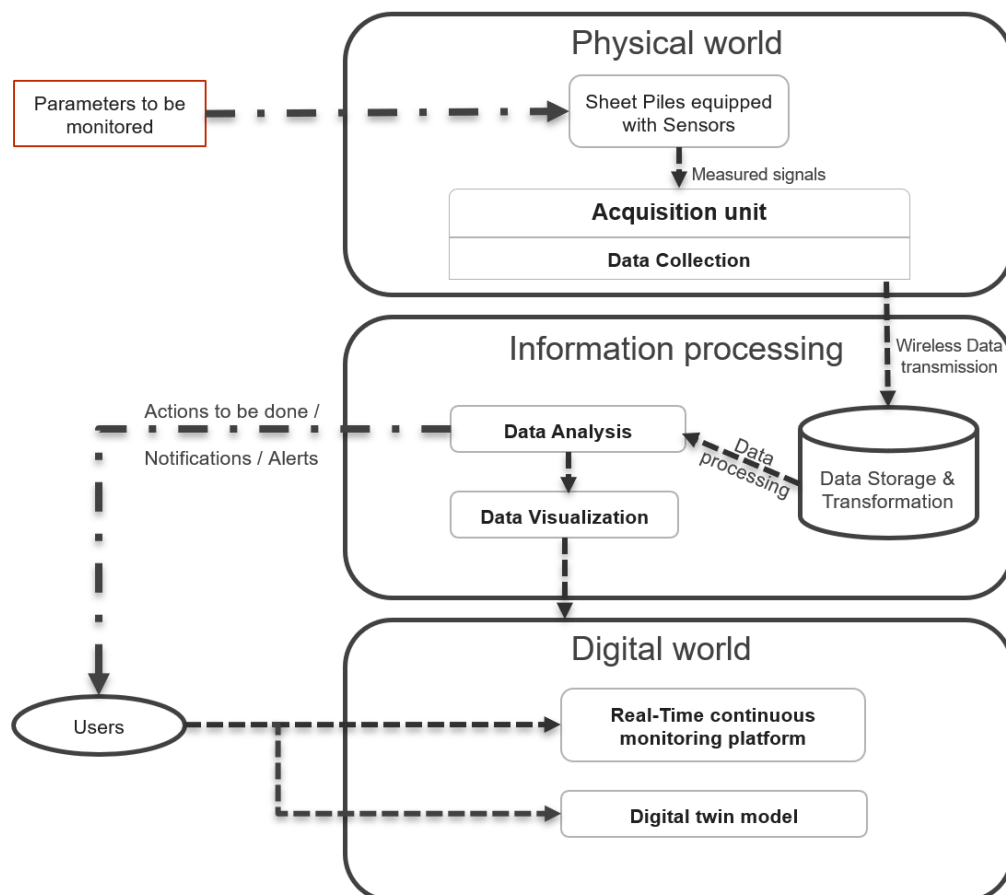


Figure 3: system architecture

Sensors are connected directly to the central acquisition system, or indirectly through LoRaWAN-type wireless network nodes when located at a distance from the central unit. Both the measurement nodes and acquisition unit are protected by specific housings designed to withstand the harsh environmental

conditions of the seaside. The preferred power supply solution involves a combination of batteries and photovoltaic panels, ensuring that energy management remains straightforward and adaptable, even for configurations with high power demands.

Remote communication with the system can be established using various methods, tailored to specific needs. RDP (Remote Desktop Protocol) communication via mobile networks is employed for system configuration, diagnostics, and updates. Typically, the system operates autonomously, securely connecting to a cloud platform to transmit measurement data and system information.

Data stored on the cloud platform can be directly accessed directly through a Dashboard, with the option to configure alarms for detecting any anomaly signals. Finally, the data accumulated over the medium and long term, in conjunction with the infrastructure's initial parameters, will serve as the foundation for training digital twin models aimed at predicting structural changes.

3.2.1 A first demonstrator

A preliminary prototype was collaboratively developed with two key partners, Zensor and Mistras, who provided the essential hardware components, including sensors, cables, and cabinets, in addition to some software functionalities. As illustrated in Figure 4, this prototype consists of an ArcelorMittal steel sheet pile profile AZ50-700, with dimensions measuring 820 x 1500 x 1200 mm and a weight of approximately 620 kg. Notably, it features an integrated aquarium designed to replicate real-world scenarios such as quay walls, allowing for the placement of sensors on the water-facing side for, enabling comprehensive testing and evaluation purposes.



Figure 4.a: the demonstrator's acquisition unit.

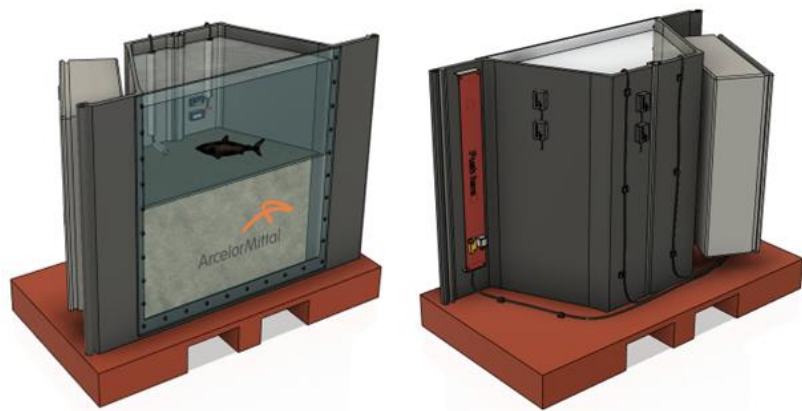


Figure 4.b: the 3D model of a demonstrator of a sheet pile equipped with sensors.

As illustrated in Figure 4.b, the demonstrator is equipped with a diverse set of sensors, including various types of corrosion sensors (Ultra-sonic thickness sensors, ER-probes, ER-coupons), an inclinometer, an accelerometer, a strain gauge, a temperature sensor, and a water level sensor. This ensemble of sensors enables the comprehensive monitoring of crucial factors, including corrosion levels, water levels, temperature variations, inclination angles, structural deformations, bending forces, and shock events.

After gathering data from the sensors, this information is transmitted to the cloud-based platform, where it undergoes a filtering process and is then presented on an online dashboard, as depicted in Figure 5. Additionally, a digital representation of the structure is provided, offering the capability to access

individual sensor data, review their current statuses, and explore the historical trends of selected parameters over time.



Figure 5 The main dashboard of the demonstrator

To illustrate, as shown in Figure 6, the system showcases detected shocks that have occurred within the last six months. Users can refine their search by applying filters based on parameters such as amplitude and specific date and time. This functionality empowers port authorities not only to identify shocks but also to precisely locate them and determine the responsible parties. As a result, it becomes possible to ascertain who caused the damage, where it occurred, and make informed decisions regarding maintenance in a timely manner.

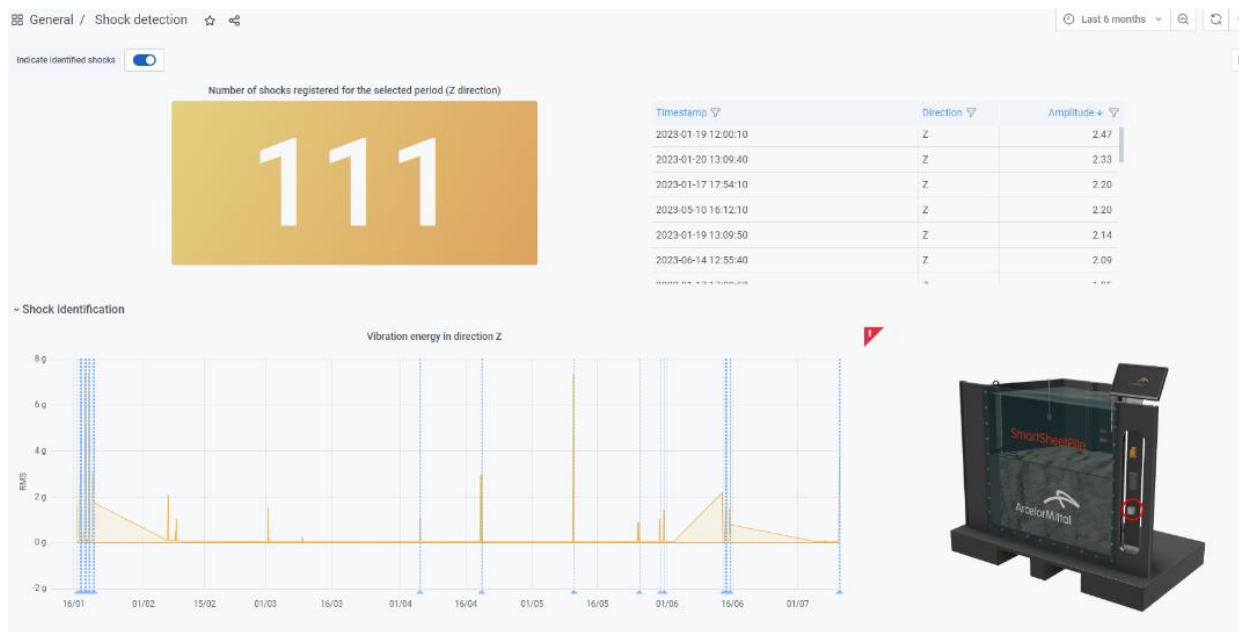


Figure 6 Overview on the Shock detection sensor of the demonstrator during the last six months



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

4. Conclusion

In conclusion, SmartSheetPile constitutes a substantial leap forward in infrastructure management, tailored to bolster the safety, sustainability, and performance of critical port facilities. Its integration of cutting-edge sensor technology with cloud-based data analysis not only provides real-time monitoring but also empowers stakeholders to engage in proactive maintenance, data-driven decision-making, and the optimization of maritime assets longevity.

The multifaceted value of SmartSheetPile is evident through its real-time remote monitoring, predictive and preventive maintenance capabilities, and the ability to reveal infrastructure strengths and weaknesses. Its digitalization aspect continuously enhances the reliability and performance of sheet piling products, contributing to enhanced infrastructure integrity and streamlined maintenance.

It's important to note that SmartSheetPile is already in progress with the execution of a first river quay wall project, demonstrating its practicality and imminent impact on strengthening vital port infrastructures. Moreover, ArcelorMittal is actively engaged in two research projects aimed at developing AI-powered analyses related to corrosion prediction models.

As the maritime industry continues to evolve, SmartSheetPile emerges as an indispensable tool, poised to play a pivotal role in securing the future of critical port facilities while continuously advancing through ongoing research and practical application.

References

1. **InCom WG** . Health Monitoring of Port and Waterways Structures. s.l. : PIANC, 2023.

Ref. Author: Margherita Carmen Ciccaglione - University of Naples Federico II (Naples, Italy)-
margheritacarmen.ciccaglione@unina.it

Co-authors :

Tommaso Tassi – F&M Ingegneria (Mirano, VE, Italy) – ttassi@fm-ingegneria.com

Marco Di Stefano – SISPI Engineering (Naples, Italy) – marco.distefano.ing@gmail.com

Massimo Ramondini - University of Naples Federico II (Naples, Italy) – massimo.ramondini@unina.it

Mario Calabrese - University of Naples Federico II (Naples, Italy) – calabres@unina.it

Key words: vibro-replacement stone columns, soft soil foundation, Salerno port

Vibro-Replacement technique for the seabed of Salerno port

Article's abstract: Among the ground improvement processes, Vibro-Replacement technique is one of the most widely-used, with first employments dating back to the 1950s. Vibro-Replacement is the process of densifying granular soils and reinforcing cohesive soils with stone columns constructed with the use of specialty down the hole Vibro-Probes. The process is performed with a vibrating poker device which can penetrate to the required treatment depth under the action of its own vibrations; then, the penetration of the poker is followed by the construction of a stone column. The column can be feed from the top (Top Feed System) or from the bottom (Bottom Feed System), depending on the ground conditions. In this paper, the technique of the Bottom Feed System is described for the case of study of the Salerno port, in southwestern Italy. With 10 million of tons moved each year, the Port of Salerno is considered one of the most efficient and dynamic ports in Europe. Therefore, in order to keep the competitiveness of this Port at a high level, adaptation of its infrastructures was needed, and, particularly, the widening of the port mouth. A real challenge, given the scarce mechanical and deformative characteristics of the seabed, on which five REWEC3®-type caissons should be laid to extend the principal pier. Thus, to further improve performances of the first 7 meters of the seabed, a Vibro-Replacement intervention has been carried out, with a triangular vibro-driving mesh of side 2 m. The Bottom Feed System has been implemented by means of a motorized pontoon, introducing large-sized inert calcareous material into the depression cone of the vibro-floated columns. This led to an improvement in the geotechnical parameters of the seabed and consequently, both a decrease in absolute settlements and a homogenization of the differential settlements between the caissons. Moreover, a decreasing of the potential liquefaction of the sandy sediments constituting the surface area of the seabed has been detected.

1. Introduction

Vibro-replacement is a global ground improvement method that utilizes bottom-feed or top-feed vibrators based on soil conditions. Both techniques pierce fine-grained soils like clay and silt, creating void column filled with crushed rock or gravel using vibrators. This forms strong "stone columns" enhancing structural integrity, stability, and drainage capacity for improved soil performance. Improved

soil attributes yield tangible benefits: ground bearing capacity and stability increase, foundation settlement response improves, and drainage capacity rises, aiding water management.

The Bottom Feed System technique was effectively recently employed, as part of the extension works of the Salerno port. This port, located in the southwestern region of Italy, stands as a notable entity with an annual cargo movement of 10 million tons, securing its reputation as one of the most efficient and dynamic ports across Europe. To uphold and enhance its competitive position, a strategic adjustment of the port's infrastructure was imperative, specifically focusing on the expansion of the port mouth. Notably, the project included the contemplation of introducing a series of REWEC3®-type caissons [1] engineered for alternative energy purposes. This addition aimed to contribute further to the economic growth of the region.

However, the nature of the seabed's mechanical and deformative attributes posed challenges in terms of the proper positioning of the caissons. Consequently, a rigorous approach involving ground improvement measures was formulated to address this intricate aspect of the project.

The objective of this study is to provide engineers and designers with valuable insights into selecting the appropriate ground improvement technique for marine infrastructures. The case study presents a relevant context for comprehending this subject. Subsequently, the text will proceed by offering a contextual introduction to vibro-replacement techniques. Then, the details of the Salerno port project will be deepened, highlighting its distinctive challenges, particularly concerning the mechanical properties of the seabed. Lastly, a brief overview of the designed ground improvement intervention will be provided.

2. A general overview of Vibro-replacement techniques

Vibro-Flotation encompasses a range of ground improvement methods that involve introducing a vibrating poker into the ground. This category includes techniques such as Vibro-Compaction and Vibro-Replacement, where the latter is often referred to as (Vibro-) Stone Columns. The Vibro-compaction is more suited for soils with a granular content exceeding 90%, while a major impact on density enhancement is reached by the Vibro-Replacement on cohesive soils like clays and silts, given that the penetration of a vibrating poker is followed by the construction of a stone column [2].

As presented in literature (e.g. see [3]), there are two distinct approaches to constructing the stone column, depending on the ground conditions. The Top Feed System method retracts the poker after initial penetration. Stones (40-75mm) are added in controlled amounts from the surface, compacted in layers by the poker's insertion and removal. The success of this methodology depends on the poker-formed hole remaining open during construction. Alternatively, the stone can be introduced into the system using a hopper connected to a rig. This specialized setup involves a rig-mounted hopper that channels the stone through a fixed conduit placed adjacent to the poker. This conduit is curved inward, allowing the stone to emerge precisely at the poker's tip. Referred to as the Bottom Feed method (see Figure 1a), this approach is designed to accommodate smaller stone sizes, ranging from 15-45mm. Distinctively, the poker remains in its position within the ground throughout the column's construction, effectively creating its own void. This characteristic renders the Bottom Feed method particularly suitable for use in undersea conditions.

Apart from enhancing load-bearing capacity and minimizing compressibility, the installation of stone columns in a consistent grid arrangement also serves to standardize varying soil characteristics. This, in turn, mitigates the likelihood of uneven settling, contributing to a more uniform settlement across the area (Figure 1c).

Regarding the design of stone columns, the technical report by [2] provides a clear and concise description. Here we want to provide some crucial aspects for designing stone columns, but the reader may refer to the book by [3] for a more comprehensive understanding.

Firstly, considering that the primary load-transfer mechanism (unless the column is extremely short) involves lateral bulging into the surrounding soil (Figure 1b), the well-known Cylindrical Cavity Expansion Theory (CCET) can be used to simulate the bulging behaviour of granular columns. This theory facilitates predictions of bearing capacity and settlement performance. As suggested by [4], the CCET can represent the measured column behaviour very well, and proposed that the ultimate vertical stress (q) in a stone column could be predicted by:

$$q = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} (\sigma'_{ro} + 4c) \quad (1)$$

where ϕ' is the friction angle of the stone infill, σ'_{ro} is the free-field lateral effective stress and c is the undrained strength.

Moreover, for estimating post-treatment settlement the method by [5] is the most used, despite its empiricism and limitations. Priebe's method defines a settlement improvement factor, n , as:

$$n = \frac{\text{settlement without treatment}}{\text{settlement with treatment}} = \frac{s}{s_i} \quad (2)$$

The factor n is a function of the friction angle of the stone ϕ' , the soil's Poisson's ratio and an Area Replacement Ratio (ARR), A_c/A , where A_c is the cross-sectional area of one column and A is the total cross-sectional area of the 'unit cell' attributed to each column. The ARR is related geometrically to the column radius, r , and column spacing, s (see panel c of Figure 1), according to:

$$\frac{A_c}{A} = k \left(\frac{r}{s} \right)^2 \quad (3)$$

where the coefficient k is π for square column grids, and $2\pi/\sqrt{3}$ for triangular ones. Beneath footings and strips, it is usually sufficient to determine A_c directly as the total foundation area divided by the number of supporting columns.

However, numerical calculations adopting the Finite Element Method (FEM) are recommended for major projects and in the presence of particularly soft soils, say below $c_u \leq 20$ kPa, provided that the elastic-plastic behaviour of the unit cell and the shear zones in the stone column can be modelled with sufficient accuracy. For large foundations, two-dimensional calculations may be sufficient, but other foundations may require the use of three-dimensional approaches. This is the case of the Salerno port mouth adaptation, which will be described in the following.

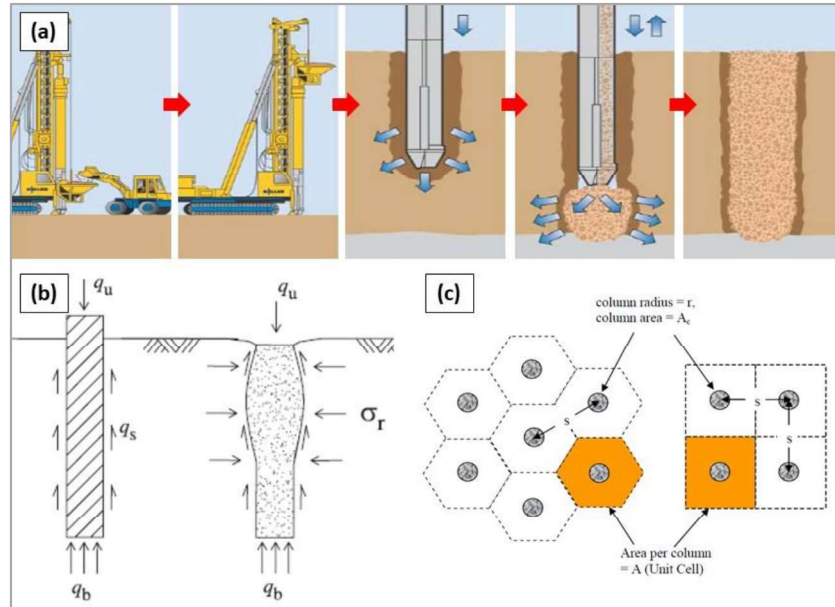


Figure 1 – (a) Bottom Feed method of stone column construction (source [1]). (b) Mechanisms of load transfer for a rigid pile (left) and a stone column (right) (after [3]). (c) Typical column arrangements, triangular grid (left) and square grid (right) (source [1]).

3. The functional-technical adaptation of the Salerno port

Salerno boasts one of central-southern Italy's most significant port areas. Because of its crucial function within the complex network of import and export logistics, the city is in a prime position to consistently draw the attention of bigger businesses, strengthening its position as a critical hub. This ongoing path of expansion is expected to persist into the future, as the dynamics of maritime commerce continue to evolve. For these reasons, functional/technical adaptation was needed to ensure secure entry, transit, and mooring within the port to ever more large vessels (with a deeper draught).

Starting from 2010, Campania Region approved the functional-technical adaptation of the port, including: (1) the consolidation of the existing quays in the commercial port; (2) the extension of the Manfredi pier; (3) the extension of the Trapezium pier; (4) the modification of the port mouth; (5) the excavation of the seabed in the harbour basin and the harbour access channel.

Amongst the above, the widening of the port mouth turned out to be particularly challenging, due to specific drawbacks linked to both the occurrence of impact loads on the new structure and the scarce mechanical and deformative characteristics of the seabed. The detailed explanation of the first issue is contained in our second contribution to the conference [6], while the latter will be fully addressed in this article.

3.1. The widening of the port mouth

The preliminary project explored two interventions to widen the port mouth: removing the terminal section of the secondary jetty's head over a 100-meter length and extending the primary jetty to enhance its performance (Figure 2a). The latter design solution was significantly influenced by the interaction between key project actions and the qualities of the weak foundation soils.

Then, for the principal jetty an extension of 200 meters was considered, following an inclined alignment of 18° with respect to the jetty. This extension was finally planned through the installation of 5 cellular caissons of the REWEC3®-type, aimed at generating alternative energy. Each of the 5 caissons, with an overall length of 32 m and a body width of 22.50 m, is positioned at a uniform depth of -11.50m atop a rubble mound foundation based at -13m (Figure 2b,c).

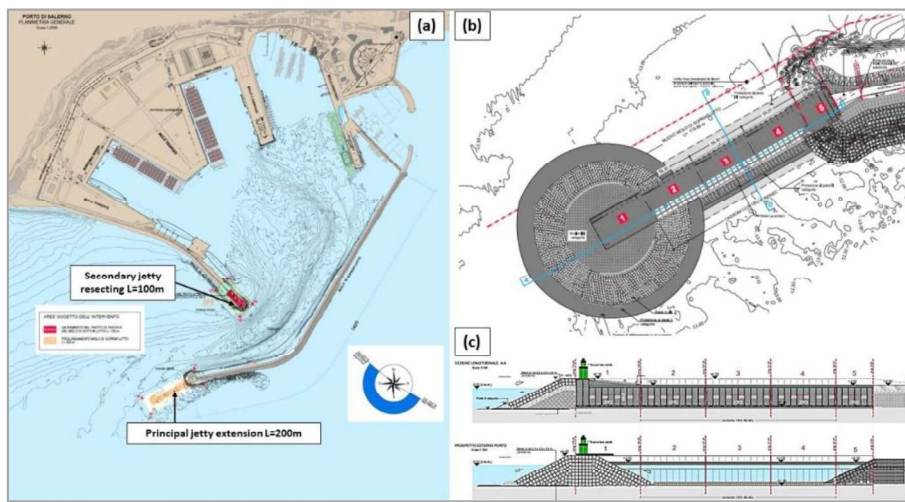


Figure 2 – (a) General plan of interventions extracted from the final project. (b) Project layout of the main pier indicating the locations of the cellular caissons. (c) Longitudinal profile of the cellular caissons extension

This final configuration was reached after the prescriptions by Technical Advisory Committee (CTA), which encompassed several important aspects, e.g. assessing both the occurrence of impulsive loads on the new structure and the stability of the caissons under such conditions. To this aim, physical model tests have been conducted in the HR Wallingford's experimental basins, and the drawbacks of the project have been solved by reinforcing the structural system and homogenising the depth at 13m.

Moreover, the CTA suggested to “perform a thorough probabilistic analysis of the risk of collapse of the breakwater using a dynamic approach in addition to the conventional pseudo-static stability verification”. In this regard, the dynamic Finite Element Model (FEM) was reconstructed to investigate the cyclic movement of the foundation soils resulting from earthquake and wave actions (each considered separately).

The model was created using three sets of geotechnical analysis and sediment characterization surveys, which underlined the massive presence of fine sands, lime, and clay, with extremely poor mechanical characteristics (see Table 1).

Then, from the geotechnical analysis it was already clear that, due to the submerged ground conditions and the significant presence of cohesive materials like silt and clay, the only possible consolidation method was the Bottom Feed Vibro-Replacement technique, encompassing the first 4 meters of bed layer. However, the simplified design tools described in Section 2 were not sufficient for the proper design of such an intervention, given both the importance of the project and the presence of particularly soft soils. Therefore, two-dimensional dynamic FEMs (using 15-node triangular elements) were developed with a twofold purpose. On the one hand, the FEM modelling allowed to a better representation of the elastic-plastic behaviour of the vibro-replacement unit cell and the shear zones in the stone column. On the other hand, the FEM accurately studied the cyclic loading conditions in the foundation soils resulting from seismic events (three accelerograms) and wave motion.

Table 1 – Geotechnical model of the seabed

Layer	Soil	Layer top (s.l.m.m.)	Layer bottom (s.l.m.m.)	Layer thickness	Unit volume weight	Friction angle	Relative density	Effective cohesion	Young Modulus
		(m)	(m)		γ (kN/m ³)	ϕ (°)			
I	Sand	-12.5	-20.0	7.5	19	30÷32	33	0÷5	10÷20
II	Sand	-20.0	-30.0	10.0	19	32÷37	41	0÷5	20÷30
III	Silt	-30.0	---	---	17	22	---	50	6

The numerical simulations revealed that the length of the vibro-replacement treatment needed to be modified. It was changed from the initially planned 4 meters to 7 meters in order to encompass the entire layer of loose sands.

3.2. The Vibro-Replacement intervention and its monitoring

Given the results of the FEM modelling, the underwater vibro-replacement intervention has been planned along the crest of the 200m extension of the breakwater. The involved area covers a total of 189 square meters with a width of 36 meters, affecting the first 7 meters of soil. The stone columns are injected using a pontoon-mounted rig, following a positioning optimized during the FEM modelling phase, along a triangular mesh with a side length of 2 meters. The triangular vibro-injection mesh is shown in Figure 3.

The limestone inert material used to form the stone columns reaches significant dimensions, up to 5-7 cm, and the additional volume of this material compared to the volume of soil involved in the intervention is 20%, approximately 925 cubic meters. This indicates a high level of attention to the solidity and strength of the treated soil, even considering the potential compaction of the material during the injection process.

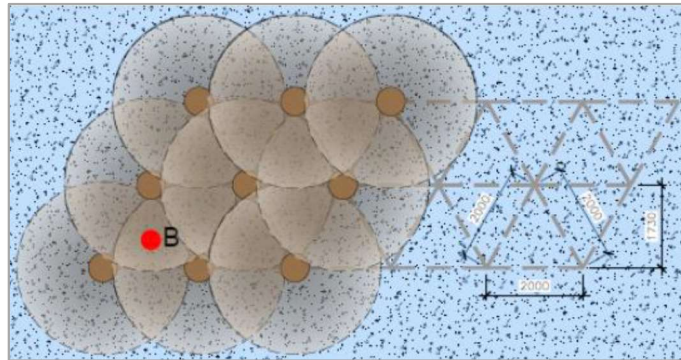


Figure 3 - triangular vibro-injection mesh for the Salerno port seabed.

The use of a triangular mesh for the placement of the columns suggests a well-studied approach to ensure an even distribution of reinforcement in the soil. Furthermore, the attention to the size of the inert material used underscores the importance of selecting appropriate materials to achieve the desired results.

After the initial revisions of the preliminary project, the prescription by the CTA and the relative adjustments, in 2019 the works for the adaptations of the port mouth started. First, the ground improvement of the seabed of the Salerno Port took place, and subsequently the building of the caissons. Notably, the reinforced concrete cellular caissons were constructed in a prefabrication basin that was floating and moored at the Manfredi dock (see Figure 4). The operational methodology, which involved floating transport using the "slipforming" technique for the mega cellular caissons, has been deemed a "best practice" and a "case study" for the students at the University of Federico II in Naples.

Clearly, to ensure the success of the intervention and monitor the conditions of the entire structure-foundation system, monitoring of settlements for the entire above-water breakwater structure has been planned using appropriate instrumentation. This allowed for control before, during, and after construction. For measuring the settlements of the foundation's bed and those induced by the presence of the caissons, apart from the multibeam survey, an automatic profiler coupled with plate load cells has been utilized. The automatic profiler enables the tracking of settlement trends during construction and consolidation phases. Within the caissons, an inclinometer is also installed to monitor the horizontal displacements of the caissons following the impulsive action of wave motion.

4. Conclusions

Vibro-replacement, a globally recognized ground improvement method, utilizes vibrators—either bottom-feed or top-feed—based on soil conditions to create stone columns filled with crushed rock or gravel. In the context of the Salerno port, the effective implementation of the Bottom Feed System aimed to enhance the seabed's geotechnical parameters. This led to a reduction in absolute settlements and the equalization of differential settlements among various structures. Additionally, it mitigated the risk of liquefaction in the shallow sandy sediments.

Considering the project's significance and the presence of particularly soft soils, a Finite Element Method (FEM) was employed to design the Bottom Feed Vibro-Replacement for the Salerno seabed. FEM analysis indicated that the improvement should cover an area of 189 square meters with a width of 36 meters, targeting the top 7 meters of soil to address the entire layer of loose sands. In summary, this study exemplifies how geotechnical engineering enhances underwater soil characteristics, mitigates settlement and liquefaction risks, and establishes a robust foundation for structures within the affected zone. It offers valuable insights to engineers and designers for selecting the appropriate ground improvement technique in marine infrastructure projects.

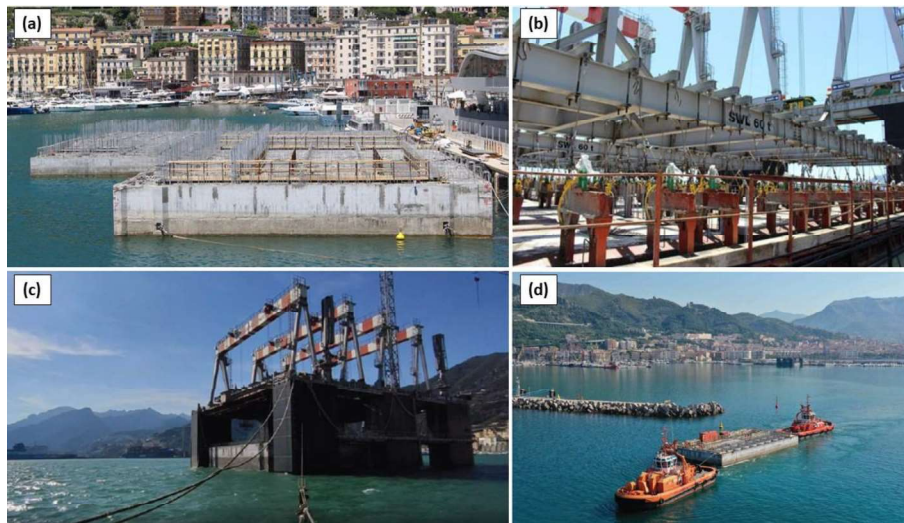


Figure 4 – (a) The first prefabricated cellular caisson of the REWEC3® type. (b) The floating prefabrication basin for the caissons with slipforming molds (c) The "Dario" basin during the launching of the caisson. (d) Movement of the cellular caisson towards the structure's head.

References

- [1] Boccotti, P., 2012. Design of breakwater for conversion of wave energy into electrical energy. *Ocean Engineering*, 51, 106–118
- [2] McCabe B.A., Black J.A., McNeill J.A., 2007. Ground improvement using the vibro-stone column technique. Technical Report for the Engineers Ireland West Region and the Geotechnical Society of Ireland, NUI Galway, 15th March 2007.
- [3] Kirsh K. and Kirsh F., 2016. Ground Improvement By Deep Vibratory Methods. Book 2nd edition. Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9781315372341>.
- [4] Hughes, J.M.O. and Withers, N.J., 1974. Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns, *Ground Engineering*, Vol. 7, No. 3, pp 42-49.
- [5] Priebe, H.J., 1995. The design of Vibro Replacement, *Ground Engineering* (Dec), pp 31-37.
- [6] Ciccaglione M.C., Di Stefano M., Tuozzo S., Buccino M., Calabrese M., 2023. Extreme events and importance of their identification: the study case of Salerno Port. Proceedings of the Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days 25-27 October 2023.

Auteur principal :

SCHWETER Lutz – lutz.schweter@aktishydraulics.com – Aktis Hydraulics –
Burgemeester van Roijensingel 2, 8011 CS Zwolle, The Netherlands

Co-auteurs :

MISIAG Wojciech – wojciech.misiag@arcadis.com – Arcadis –
Lübeckplein 34, 8017 JS Zwolle, The Netherlands

LOPEZ Luis – lopez@aktishydraulics.com – Siport XXI, since 24.04.2023 Aktis Hydraulics –
Burgemeester van Roijensingel 2, 8011 CS Zwolle, The Netherlands

VAN DEYZEN Alex – alex.van.deyzen@RHDHV.com – Royal HaskoningDHV –
Laan 1914 no.35, 3818 EX Amersfoort, The Netherlands

Mots clés/Key words : Port engineering, safe mooring, Dynamic and Static Mooring Analysis

THE BEHAVIOUR OF A MOORED SHIP IN WIND: THE DIFFERENCE BETWEEN A STATIC AND DYNAMIC MOORING ANALYSIS

Résumé de l'article:

Ce document présente les résultats d'études d'amarrage réalisées indépendamment par des professionnels spécialisés dans l'analyse dynamique des amarrages. D'importantes différences entre l'analyse statique et l'analyse dynamique de l'amarrage sont présentées pour différents types de grands navires. L'analyse se concentre sur le facteur d'amplification dynamique (DAF), un nombre sans dimension utilisé pour décrire le rapport entre les charges maximales calculées à l'aide de méthodes dynamiques et statiques. Il est démontré que les effets des vents variables dans le temps sur les navires amarrés dans des ports abrités peuvent induire une réponse dynamique qui se traduit par des DAF beaucoup plus importants que les facteurs de sécurité prescrits par les directives techniques lors de l'utilisation de méthodes statiques.

Note : Cet article a également été présenté à la COPEDEC X 2023 de l'AIPCN [12].

Article's abstract :

This paper presents results from mooring studies carried out independently by professionals specialized in Dynamic Mooring Analysis. The important differences between static and dynamic mooring analysis are shown for different types of large ships. The analysis focusses on the Dynamic Amplification Factor (DAF), a dimensionless number used to describe the ratio between the maximum loads derived using dynamic and static methods. It is shown that effects of time-varying wind on moored ships within sheltered ports have the potential to induce a dynamic response resulting in DAFs being much larger than any safety factor guidelines prescribe when using static methods.

Note: This paper was also presented at PIANC COPEDEC X 2023 [12].

Article :

1. Background

International recommendations and guidelines like British Standard (2014), EAU (2020), ROM (1990) or OCIMF (2018) consider mooring analysis based on a static calculation of the response of the moored ship under action of constant wind from different directions as a valid approach.

As an equivalent static wind speed accounting for dynamic effects, a maximum “gust wind speed” is employed. This speed is typically based on a 30s-averaged wind speed. According to the explanation in relevant guidelines, larger ships respond to wind gusts in the range of 15-60s, and this “justifies” the use of the equivalent static wind speeds, however, it is far from the physics governing the moored ship responses to time-varying wind. This way, the hourly averaged wind speed is increased by 30 50% (depending on the local wind conditions, type of terrain, etc. or on the adopted wind spectrum) to calculate the maximum expected wind forces and static responses of the ship and its mooring system. In the same way, a full 360° wind rose is analysed, covering sectors of both offshore and shore winds.

Some of these guidelines define on top of using gust wind speeds certain safety factors for the mooring line loads to account for dynamic effects when using results of static calculations for mooring analysis (meaning an increase of line forces obtained from static analysis by this safety factor). This approach can be found in guidelines on mooring analysis of offshore installations, but it is missing in most of the guidelines for mooring analysis in ports.

2. Problem

Several problems can be highlighted when using this static method for wind driven mooring assessments:

- (1) The most important problem is that the dynamic effects are not included in the static mooring analysis. The presence of dynamics and changes of responses cannot be covered by safety factors imposed on static forces or by an arbitrary increase of equivalent static wind speed. Therefore, the maximum loads are usually underestimated leading to potential failures in the design of mooring equipment and supporting structures. This is particularly important for ships with a relatively soft mooring system and for mooring configurations with low dissipation of motion energy, which is associated with long natural periods of the mooring system in sway and yaw. These failures in the design may lead to unsafe operations and/or unsafe operational decisions under demanding weather conditions with consequences for the safety of the people involved, the ship and her cargo, the port and terminal infrastructures, and the natural environment.
- (2) The static method lacks correct results for off-berth winds as the fenders show no load because the ship new equilibrium position is off the fenders – while typically these off-berth winds are the most demanding conditions for fender systems as the ships bounces onto and off the fenders in a repetitive pattern.

3. Approach

This paper presents results from two mooring studies carried out independently by four consulting engineering professionals from different companies specialized in Dynamic Mooring Analysis. The important differences between Static (SMA) and Dynamic Mooring Analysis (DMA) are shown for two different types of large ships: container ships and tankers. The excitation is wind; current and waves are not considered.

The authors want to highlight how the DMA approach can avoid the danger of underestimating the mooring line loads and fender deflections by showing how the results from a SMA considering gust wind speeds (30s-averaged) as the equivalent static wind speed compare with the results from a DMA considering time-varying wind.

4. Dynamic Amplification Factor (DAF)

The Dynamic Amplification Factor (DAF) is a ratio between the dynamic response of the system, caused by time-varying loads, and the static response of the system, caused by static loads being some approximation of the time-varying loads. In case of a moored ship the responses are ship motions and the mooring system loads.

To explain the origin of DAFs and to indicate what they depend on a simple model of pure sway motion in time-varying wind is used in our extended version of this paper as published for PIANC COPEDEC X 2023 [12]. The reason for DAFs is the resonance in the mooring system (ship inertia, ship hydrodynamic forces, and elastic mooring system comprising of mooring lines and fenders), driven by the time-varying part of wind forces. In [12] it is shown that for a given wind speed U_0 , the motion and force DAFs depend mostly on the damping ratio ξ .

5. Case studies

5.1 Case study 1: tanker

This case study was carried out for an operator who intended to receive larger (Suezmax) tanker at a terminal originally designed for Aframax tankers. Since the jetty was to remain unchanged then the consequences for the safety of mooring the ship at the present terminal had to be investigated.

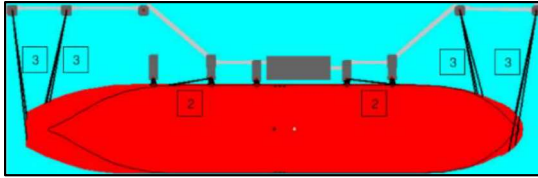
A DMA was carried out to establish the limiting environmental conditions for the safe mooring of the Suezmax tanker considering the (limited) capacity of the present fenders and bollards and the prevailing environmental conditions. The calculation of the response of the moored ship on the environmental forces and the resulting mooring system loads was carried out in the time domain using Arcadis's numerical model SHIP-Moorings. SHIP-Moorings simulates the dynamic, non-linear response of one or more moored vessels (6 degrees of freedom) and the mooring system on wind-, current-, wave- and passing ship forces. The results are motions of the vessel in one or more special locations (e.g., Centre of Gravity or manifold) as well as mooring line, bollard, and fender forces.

The jetty has 5 mooring and 5 berthing dolphins. Each berthing dolphin is equipped with a single conical buckling type fender. Each mooring and berthing dolphin is equipped with a single bollard.

The ship is a Suezmax tanker, see *Table 1*. As the main environmental forcing was wind, the ship in ballasted condition (=largest windage area) was investigated. Wind and current drag force coefficients from OCIMF (2018) were applied. The hydrodynamic characteristics of the ships were computed using the 3-D diffraction theory software DIFFRAC of MARIN. The ship is equipped with 8 double drum winches from which in total 16 mooring wires (Minimum Breaking Load MBL 83.3t, Working Load Limit WLL 45.8t) with nylon tails (MBL 110t, WLL 55t) can be given out. Considering the mooring equipment on board and at berth below mooring plan was developed.

Table 1 Design ship characteristics and mooring plan

Design ship	Suezmax tanker
Cargo capacity DWT	158,000t
Length over all LOA	274.0m
Beam B	48.0m
Draught T	7.6m
Displacement Δ	78,500t
Transverse windage area A_{wt}	1,330m ²
Longitudinal wind area A_{wl}	5,530m ²



Wind conditions as specified in Table 2 were selected. The variation of the wind velocity around the hourly averaged value U_{3600} is determined by the spectral shape of the wind signal, for which an API spectrum was used. The 30s gust speed U_{30} was determined based on API (gust factor of 1.265). The variation in the wind direction U_{dir} is included according to Simiu & Scanlan (1986). Each wind condition was simulated with 10 realizations. For the SMA the 30s gust wind speed was used.

Table 2 Wind conditions applied during DMA

U_{dir} [°N]	U_{3600} [kn]	U_{30} [kn]
0-330 in 30° steps	25, 30, 35, 40, 45, 50, 55	32, 38, 44, 51, 57, 63, 70

Table 3 shows the maximum line loads for wind of $U_{3600}=35$ and 50kn (related $U_{30}=44$ and 63kn).

Table 3 Maximum line loads derived from static and dynamic simulations and resulting DAF

Maximum line loads [kN]	U_{dir} [°N]											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
DYNAMIC $u_{3600}=50$ kn	412	150	104	125	173	239	381	845	948	1022	857	532
STATIC [$u=u_{3600}$] $u=50$ kn	240	137	90	79	123	174	183	222	268	228	223	167
DAF ₃₆₀₀	1.7	1.1	1.2	1.6	1.4	1.4	2.1	3.8	3.5	4.5	3.8	3.2
STATIC [$u=u_{30}$] $u=63$ kn	389	189	96	81	159	271	284	369	436	372	367	242
DAF ₃₀	1.1	0.8	1.1	1.6	1.1	0.9	1.3	2.3	2.2	2.7	2.3	2.2
STATIC [$u=u_{30}$] incl. safety factor 1.5	584	283	145	121	239	407	426	554	653	557	551	363
DAF ₃₀	0.7	0.5	0.7	1.0	0.7	0.6	0.9	1.5	1.5	1.8	1.6	1.5
DYNAMIC $u_{3600}=35$ kn	159	111	90	103	118	143	157	349	454	406	345	185
STATIC [$u=u_{3600}$] $u=35$ kn	139	106	85	77	98	118	122	116	128	111	104	118
DAF ₃₆₀₀	1.1	1.1	1.1	1.3	1.2	1.2	1.3	3.0	3.5	3.7	3.3	1.6
STATIC [$u=u_{30}$] $u=44$ kn	189	123	88	78	112	149	156	175	205	178	173	146
DAF ₃₀	0.8	0.9	1.0	1.3	1.1	1.0	1.0	2.0	2.2	2.3	2.0	1.3
STATIC [$u=u_{30}$] incl. safety factor 1.5	283	184	132	117	168	224	233	263	308	267	259	219
DAF ₃₀	0.6	0.6	0.7	0.9	0.7	0.6	0.7	1.3	1.5	1.5	1.3	0.8

The expected maximum value of the line load computed with the dynamic approach can be up to $DAF_{3600}=4.5$ times higher than the one resulting from the static approach using the mean hourly wind velocity. Using the 30s averaged velocity of 63kn in the static simulations results in a DAF_{30} of 2.7. Even when these static loads are multiplied with a safety factor of 1.5 to account for dynamic effects (as recommended by some international guidelines) the expected maximum line load resulting from the DMA is a factor 1.8 higher for the worst-case wind direction. For lower wind velocities this amplification factors become smaller, resulting in a DAF_{30} of up to 2.3 for a 35kn (hourly) averaged velocity. The same effect can be seen for more convenient wind directions.

As can be seen in Figure 1 using static methods would result in the conclusion that even under the 50kn hourly averaged wind condition line loads stay within the criterion (WLL=55% MBL). Using dynamic method shows that hourly averaged wind velocities need to be reduced to 35kn to end up with acceptable line loads.

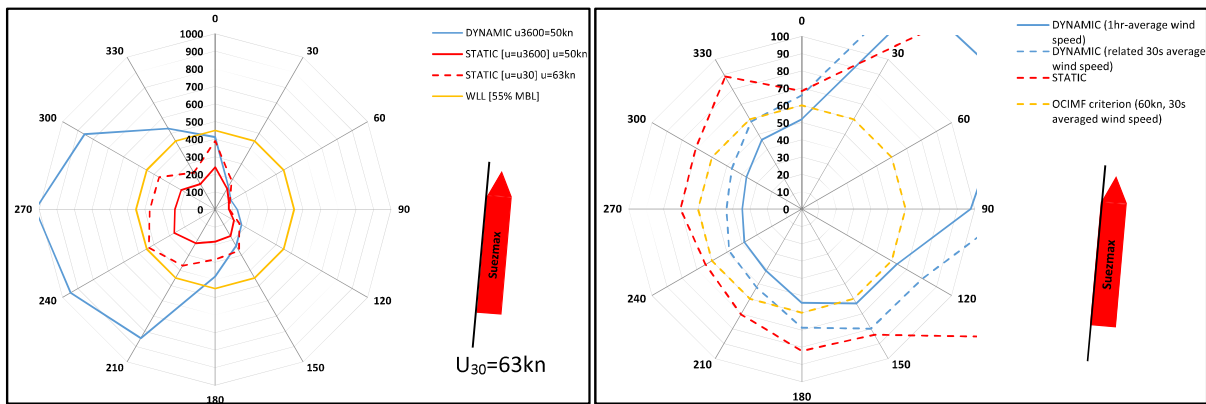


Figure 1 Maximum line loads (left) and limiting wind velocities (right) derived from DMA & SMA

5.2 Case study 2: container ship

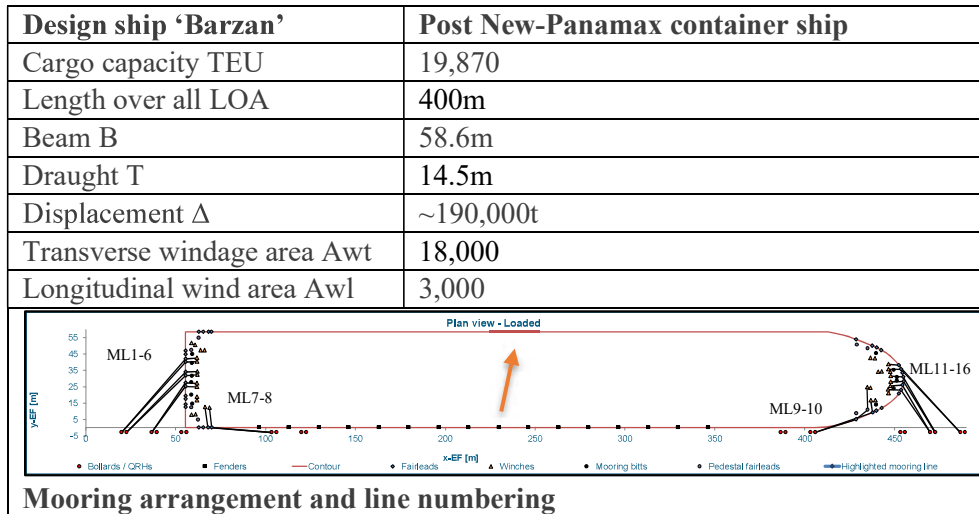
This case study was carried out as an internal research project to show in-depth the difference in the mooring line and fender loads based on a Static and Dynamic Mooring Analysis for a Post-New Panamax (400m) container ship in wind. A SMA was carried out using both 30s and 10-minute average wind speeds. A DMA was carried out using time-varying (i.e., gusting) wind speeds around the hourly mean wind speed. The software used was aNySIM and DIFFRAC, both developed by MARIN. No additional viscous surge, sway and yaw damping has been applied. The only damping in the system is the potential damping. The simulation length is 3.5 hours, of which the first 30 minutes are not included in the statistical analysis of the maxima and minima (transient response).

The quay is equipped with bollard pairs, with a capacity of 240t each and a centre-to-centre distance of 16.7m. The quay is equipped with cone fenders.

The ship is a Post New-Panamax container ship the “Barzan”. Table 4 depicts its main particulars. The wind coefficients are based on wind tunnel tests carried out by Marikom, on the instructions of Hamburg

Port Authority (2020). The “Barzan” is moored with 16 polyester lines (MBL 130t, WLL 65t, pretension 5% MBL).

Table 4 Main dimensions Barzan from RINA (2015)



The wind conditions have been systematically varied. The 10-minute average wind speed U_{600} has been used as basis. The simulated wind speeds are 8-34m/s, in steps of 2m/s. The simulated directions are 0 to 360 degrees, in steps of 22.5 degrees. The conversion to 30s gust (U_{30}) and hourly mean wind speed (U_{3600}) is based on a time-series analysis of the generated time-varying wind speed in aNySIM. A Harris wind spectrum has been simulated. The conversion factors are wind speed dependent, see Table 5.

Table 5 Simulated wind speeds (including conversion factors)

U_{3600} [m/s]	U_{600} [m/s]	U_{30} [m/s]	U_{3600}/U_{600}	U_{30}/U_{600}
9.59	10	12.19	0.9590	1.219
13.50	14	16.90	0.9643	1.207
17.42	18	21.50	0.9678	1.195
21.35	22	26.04	0.9705	1.183
25.28	26	30.51	0.9723	1.174
29.22	30	34.98	0.9740	1.166
33.17	34	39.45	0.9756	1.160

For off-quay wind (indicated by the arrow in Table 4) the difference between SMA and DMA are clear. Figure 2 is a bar plot showing the maximum mooring line force in each line during the simulation for a 16m/s 10-min averaged wind speed (7 Bft). The ratio between the determined maximum mooring line force based on the DMA (hourly mean wind speed) and SMA (30s gust) is circa 2.

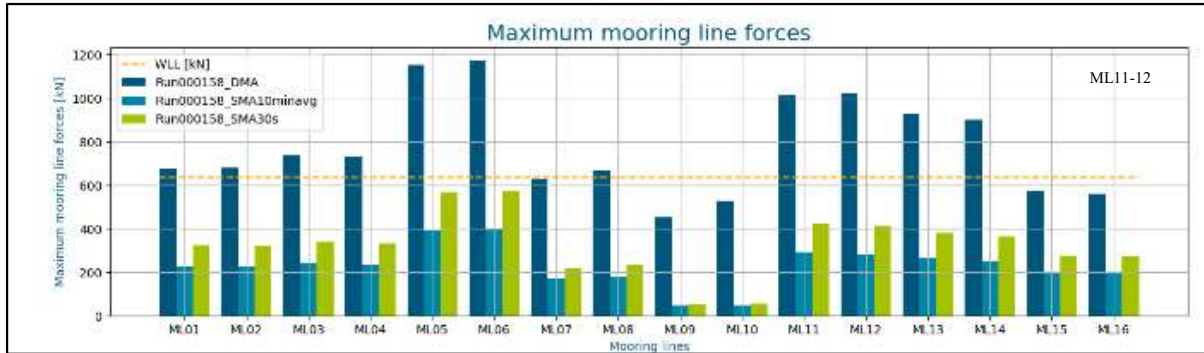


Figure 2 Bar plot maximum mooring line forces off-quay wind (16 m/s 10-min average)

The same trend is visible for multiple wind speeds and directions. Figure 3 shows the maximum mooring line forces based on the DMA and SMA (30s gust) respectively. The static method lacks correct results for off-berth winds as the fenders show no load because the ship new equilibrium position is off the fenders while typically these off-berth winds are the most demanding conditions for fender systems. The difference in maximum mooring line forces and fender deflections is the cause of major difference in limiting wind speeds.

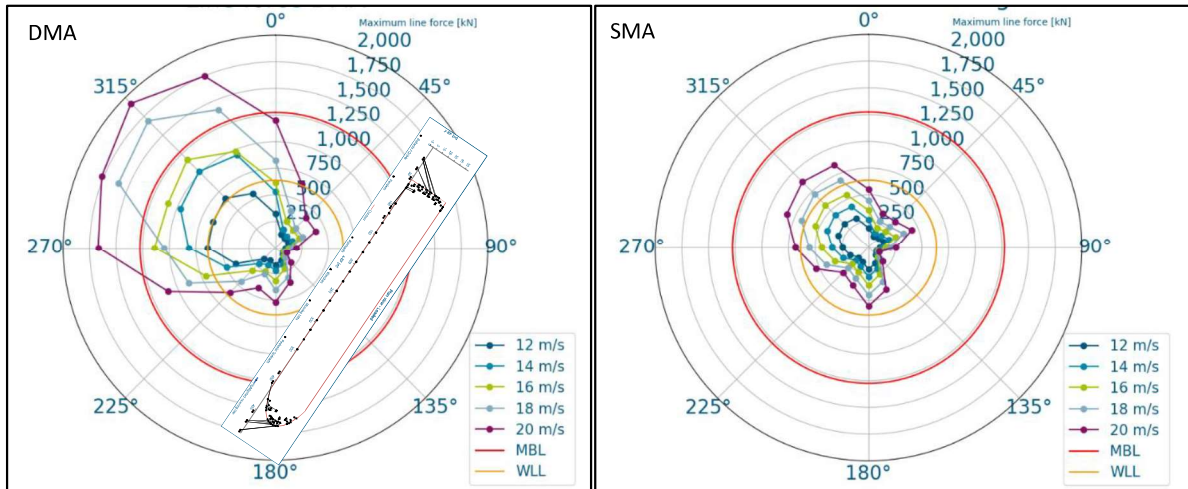


Figure 3 Polar plot maximum line forces DMA (left) & SMA (right)

Table 6 show the limiting wind speeds for the considered 19,870 TEU container ship based on the three different assessments. By dividing the maximum mooring line forces at the limiting wind speeds the DAF_{30} can be determined. Table 6 shows the DAF_{30} at the limiting wind speed for off-quay wind directions ($\pm 45^\circ$). The DAF_{30} are based on the coincidental maximum mooring line force found in the simulation for the DMA. Only one wind speed realization has been modelled; repetition runs with different random seeds, i.e., different wind speed realizations, to determine the Most-Probable Maximum (MPM) have not been carried out.

Table 6 Limiting wind speeds based on maximum mooring line force and fender deflections and DAF_{30} at limiting wind speed for critical wind directions

Udir [°N]		DMA	SMA (using U_{30})	DAF_{30}
225	SW	20.3	28.8	2.1
247.5	WSW	15.3	22.0	2.1
270	W	12.0	19.3	2.6
292.5	WNW	12.0	17.4	2.3
315	NW	11.8	16.9	2.1
337.5	NNW	12.4	17.3	2.3
0	N	16.2	21.5	1.8
22.5	NNE	19.9	26.8	1.9

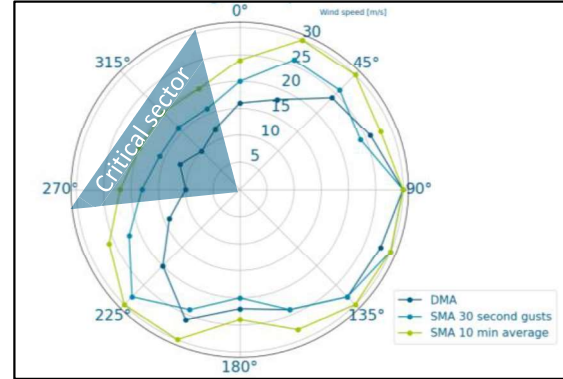


Figure 4 depicts the maximum mooring line forces for 10 repetition runs for off-quay wind (12m/s 10-min average). The figure shows some fluctuations in the maximum mooring line force dependent on wind speed realization. The spreading, however, is limited. The DAFs presented in Table 6 are therefore still valid. For this fully loaded 19,870 TEU container ship a DAF of between 2-2.5 can be expected.

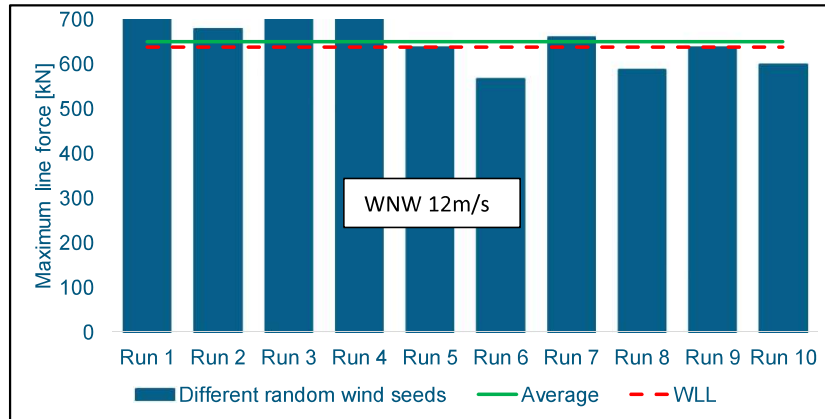


Figure 4 MPM analysis off-quay wind

6. Discussion and Conclusion

The dynamic amplification factor (DAF), ratio between the maximum loads derived using dynamic (DMA) and static (SMA) methods for mooring analysis have been investigated. The authors, from various independent consulting companies, found important differences in several studies for their companies performing SMA and DMA according to the state of the art and industrial standards, and arrived at the same conclusions. Two samples of this studies have been included in this paper, for two different types of ships (tanker and containership), berth configurations (jetty and quay wall) and locations. In both cases, the dynamic response was governed by (gusty) wind conditions.

It is shown that dynamic effects (i.e., in this case the gustiness of the wind and the dynamic response of the moored ship to these wind forces) play a significant role in investigating moored ship behaviour and related mooring system loads at berths subject to (high) wind loads. In both cases, DAF_{30} may range between 1.0-3.0 depending on the wind speed and direction. This means it is not possible to apply a safety factor approach that cover all the possible results. These results were also found in other studies including variety of ships, berth configurations and metocean conditions.

A theoretical approach [12] showed for a simplified 1 DoF dynamic system that the DAFs vary, depending on the dynamic characteristics of the system. For the 1 DoF dynamic system these characteristics can be summarized in the different ratios for mass, spring characteristics, governing the natural frequencies of the system, and damping. For the response of a moored ship, there are additional coupling effects between the 6 DoF. The DAFs are expected to appear in any kind of time-varying loads acting on the moored ship (waves, current, passing ship).

The authors want to highlight the risk of underestimating maximum motions and loads on the mooring lines when applying static approaches (SMA) to mooring systems, that must be modelled as dynamic systems (DMA). A static analysis may give a too optimistic loads assessment at least for the worst-case scenarios, which are the most important ones for the design or upgrade of maritime terminals; too optimistic means too low mooring system loads at specific wind speed or too high value of the “safe” wind speed. Finally, we recommend the designers to carefully assess the selection of the mooring analysis tool, as results from static approaches even following highly reputed and widely used international standards and guidelines, does not always guarantee safe results for design and operation. In the same way, we recommend the standards and guidelines publishers, to review the mooring analysis guidelines in the light of the presented results and conclusions to ensure the quality of the results from mooring analysis.

7. References

- [1] American Petroleum Institute, 1993. RP 2A-LRFD.
- [2] British Standard, 2014. BS 6349-4:2014.
- [3] EAU, 2020. Empfehlungen des Arbeitsausschusses "Ufereinfassungen" Häfen und Wasserstraßen.
- [4] Hamburg Port Authority, 2015 & 2020. (Revision of) Test report on Wind Tunnel Studies MARIKOM.
- [5] Puertos del Estado, 1990. ROM 0.2-90: Actions in the design of maritime and harbour works.
- [6] Naess, A., Moan, T., 2013. Stochastic Dynamic of Marine Structures, Cambridge University Press.
- [7] Newland, D.E., 2005. An Introduction to Random Vibrations, Spectral and Wavelet Analysis, 3rd edition.
- [8] OCIMF, 2018. Mooring Equipment Guidelines MEG4.
- [9] RINA, 2015. Significant ships 2015.
- [10] Simiu and Scanlan, 1986. Wind effects on structures: An introduction to wind engineering.
- [11] Wirsching, P.H., Paez, T.L., Ortiz, K., 2006. Random Vibrations – Theory and practice.
- [12] Schweter, van Deyzen, López, Misiag, 2023. The behaviour of a moored ship in wind: the difference between a static and dynamic mooring analysis. PIANC COPEDEC X 2023.

City – Port Integration under aspects by nautical tourism and urban development

Professor Dr. Heiner Haass, architect
Deutsche Marina Consult, Hannover/Germany
www.d-marina-consult.de ; zentrale@d-marina-consult.de

1. Introduction

The City-Port relationship in former times was separated neighbourhood. Historically, the commercial harbor was an independent development in urban development that was deliberately separated from the (“beautiful”) side of the city. In many port cities, the port area was off the beaten track and was often partitioned off and fenced off. Also mostly strictly guarded as an independent customs area. The port areas were sometimes feared areas, in any case hardly accessible for public use and in no case attractive city areas.

The city-port relationship was one of juxtaposition rather than coexistence, although from an economic point of view most cities have clearly benefited from their ports. This relationship has been practiced, unconsciously, for many centuries. Ports brought prosperity and cultural diversity to the cities, but also epidemics and crime, etc.

As long as shipping was one of the important branches of the economy, this relationship worked very well. Only when the importance of shipping declined did this coexistence also change. At this time, around 1960 - 1970, shipping was becoming less important as a means of transport. Many ports also opened up in terms of area and moved closer to the cities.

At the same time, nautical tourism began to increase and brought a completely new component to the city-port relationship. The tourist boats need berths and numerous marinas are springing up on the Mediterranean. The emergence of tourists from the ports in the cities created a very interesting interaction between nautical, tourism, port and city.

An interesting transformation is currently taking place that will have a major impact on the future of the city-port relationship. The great attractiveness of nautical tourism will reposition this relationship. Commercial shipping is losing importance, but is being replaced in importance by nautical tourism. This tourism segment will become the main segment of port cities in the future and will become the economically most important element of the cities. This form of tourism is found in both coast and inland port cities.

The functional connection of boats, tourists and the city also initiates spatial and architectural dependencies and interactions, which will trigger an as yet unforeseeable potential of conditions and dependencies. This path of transformation will determine the future of both elements, city and port, and the tasks of future urban development can be seen here.

City-Port-Relationship

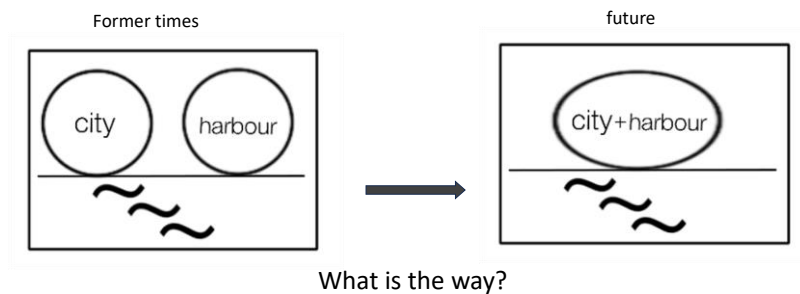


Figure 1: Schematic of City-Port-Relationship

2. article

Due to the increase in area in the cities during industrialization and in the 1960s and 1970s, the port area slipped into the focus of urban development. Many. Also derelict port areas came into prime locations in the cities and became valuable, attractive and expensive development areas. The innercity locations of the port cities have also grown and have reached the port areas. In the meantime, most ports have been included in the urban development plans of the cities and are on the way to becoming attractive urban water districts. The integrated and integrative development must take place under some essential aspects. These development areas have now been recognized as valuable areas for current urban development (on the water).

2.1 The (new) port interests of the white industries must be integrated into the goals of urban development. It is no longer a juxtaposition of port and city, but rather a togetherness that is important. The port becomes part of the city and interacts closely with urban developments. The new white industry gives the port areas a higher value and will be the driving engine of the cities for the next generations. Also economically, tourism will be the most stable factor for most cities and regions.

2.2 Co-development must produce, use and market high quality waterfront land. The variety of uses from tourism, trade, retail, gastronomy, culture and urban life opens up numerous opportunities for all port cities. The classic port management is no longer up-to-date, a new era of management of the port areas is beginning, which is multi-structural. Ports become service providers in nautical tourism.

2.3 (Nautical) tourism is becoming a key branch of urban development on the water. The (new) white industry gives the cities an attractive economic boost, which can only take place successfully on the (water) surfaces of the ports.

While other branches of the economy slide into recession, tourism remains a stable branch of the economy that is predestined to generate large sales, especially on the waterfront. It can be seen that this trend will continue at least for the next generation (approx. 25 years).

2.4 The areas of water that have now slipped into the inner cities are to be understood and used as a valuable climate factor. Water surfaces are climate producers by evaporating, cooling and cleaning. This is a central aspect of the future for the microclimate-stressed cities, but it also ensures the ecological sustainability of these projects. Water surfaces play a central role in the city, especially as a contribution to improving and stabilizing the urban microclimate.

2.5 Numerous new offers and urban uses are opening up, all of which are of very high quality and economical. In particular, new residential areas near the water and even floating buildings are made possible. This aspect is particularly interesting as the housing issue is an ongoing issue across Europe. Through the construction of apartments at and on the waterworks, the municipal real estate market is relaxing and at the same time gaining in attractiveness. It's not just about second homes or holiday apartments, but also permanent homes on and by the water

2.6 New energy technologies are made possible on and with the water. Hydropower, water heat, light reflections for PV systems, etc. are many examples of technological uses of water surfaces. If the municipalities are open to technology and take up innovative concepts, municipal water areas also make a significant contribution to energy relaxation.

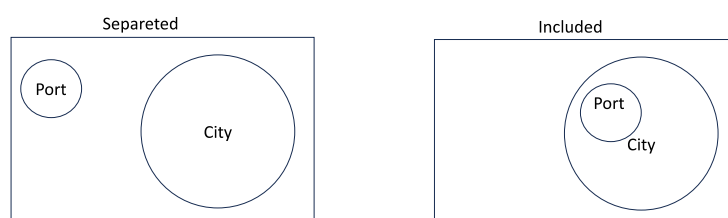
2.7 The large contiguous water areas of the ports also enable innovative, water-based mobility concepts in urban areas. Water taxis and buses, water transport and water supply/disposal technologies would be possible if the water areas of the former ports are now integrated into the city structure.

The key to this development is the development of nautical tourism and marinas in city locations. In this respect, they are of central importance. The entire urban development on the water is opened up via this modern branch of the tourism industry. There are various benefits triggered by nautical tourism in cities.

* modern marinas bring multi-use to the shore and water areas. Culture, gastronomy, retail, technical service and services are brought to the previously monostructural port areas.

* The SY business raises the quality level of marinas. Services such as hotels. Meeting rooms, catering Etc. are added, which are required in the high-level segment.

City and Port in urban development



- Urban development is increasing the city
- Ports are absorbed by Cities
- Ports located in 1A- sites

Figure 2: Schematic of developing methods

- * Cruise ships also live up these areas by using their technical systems at the same time SY can be used. The capacities of the technical Supplies can be shared between both types of ships, making these facilities more economical. Cruise terminals are becoming hot spots on urban waterfronts by offering a wide range of shops, services and restaurants and enabling ship-watching.
- * Marinas generate profitability through many guests and visitors. So solve e.g. 1 berth Up to 10 other marina guests, who in turn generate expenses that are in the economic flow into the community cycle.
- * These developments also bring benefits for the urban population by increasing the quality of life and stay in the cities. This in turn benefits the economic and cultural situation, making the city more attractive for visitors and tourists.

The goal must be aligned and common economic interests of the port development and the city, which can be achieved by integrating the port potential into urban development.

So what is required to achieve these goals of water-oriented urban development?

The above benefits are known in many water towns. But the initiative and models for implementation are lacking. A first step is the installation of public-private working groups that initiate a port-city development. This is initially a non-binding and informal initiative, which can, however, have a considerable impact on urban development. This working group paved the way for further developments by bringing together and overlapping many different interests and goals. In this first phase of a development project there is the greatest uncertainty, since these activities are not official and are based on the initiative of a few private individuals. It takes a lot of commitment and strength to get through this phase.

In a further phase of this work, key people in this flat share may also collect initial capital in order to carry out initial costly work (planning).

In this phase of development, the private character of the works is also transferred into public and formal planning processes. From this point on, the development becomes a formal waterfront neighborhood development in the city and continues to follow the formal rules of urban development. With that, the development has become official and will proceed regularly.

Conclusion and perspectives

Looking ahead to a future city on the water is interesting. The way the attractive and economically successful boat shows on the Mediterranean look like today, it can also look like in the future in inland port cities etc. (examples such as Monaco, Cannes, Genoa, La Rochelle, Amsterdam etc.). The City use the potentials of the water surface as a great benefit to increase more attractivity for inhabitants and visitors. The touristic sector will be in future the main and important economic sector and so the harbour cities must develop in this direction. The new urban lifestyle is a “maritime urban lifestyle” like an permanent boatshow in the city.

Finally a look forward

- The big boatshows will explain



- 1A- Site of City

(<https://www.cannesyachtingfestival.com>)

Figure 3: Example of maritime urban lifestyle



Auteur principal : Messineo Francesco – francesco@messineo.it – PIANC Italian Section – Via Nomentana 2, Roma – Italy

Co-auteur : Pavia Rosario – rosario.pavia@gmail.com – PIANC Italian Section – Via Nomentana 2, Roma – Italy

Mots clés/Key words : Ports, Villes, Aménagement, Développement durable / Ports, Cities, Planning, Sustainable development

New perspectives for port cities planning in Italy

Résumé de l'article : Le document vise à analyser l'état de la planification portuaire en Italie afin d'obtenir des orientations pour un développement plus organique des plans portuaires et une gestion plus efficace des relations entre ports, villes et territoires.

Dans cette direction, un premier point à souligner est qu'en Italie, le processus de planification portuaire implique les villes portuaires dans leur ensemble.

Les ports sont historiquement et structurellement situés au sein des villes. Cette condition ne peut pas être éliminée. Alors qu'en Europe les ports se sont éloignés des villes au fil des processus de décentralisation successifs, en Italie, sauf quelques cas, les ports sont restés et se sont développés dans le territoire urbain, souvent au cœur même de la ville antique.

La proximité et la coprésence de ces deux parties ont déterminé une condition de conflit et une articulation complexe du système régulateur de l'aménagement portuaire: d'un côté le plan urbain et de l'autre le plan portuaire, avec des visions et des intérêts souvent opposés. Le processus de planification est donc lourd, discontinu, avec des délais de formation et d'approbation trop longs et incertains par rapport aux besoins d'efficacité et de compétitivité des systèmes portuaires en tant que nœuds avancés du réseau logistique.

La mise en place du "Document de Planification Stratégique du Système" (DPSS), la redéfinition des "Orientations pour l'élaboration des plans de régulation portuaires du système", les nombreux investissements pour la qualité de l'environnement et la transition écologique (Next Generation EU), les récents programmes de réaménagement du waterfront, ouvrent définitivement une nouvelle phase de planification portuaire.

Article's abstract : This paper analyzes the current state of port planning in Italy in order to gauge guidelines and directions for a more organic development of port plans and a more efficient management of relations between ports, cities, and territories.

In this direction, the first point to highlight is that the port planning process in Italy involves port cities as a whole.

Ports are historically and structurally within cities. This condition is ineradicable. While in Europe ports have moved away from cities via subsequent processes of decentralization, in Italy, except for a few cases, ports have remained and expanded into the urban territory, often in the very heart of the ancient city.

The proximity and co-presence of these two parts have resulted in a conflicting condition and a complex articulation of the regulatory system of port planning: on the one hand, the urban plan, and on the other, the port plan, often with opposing visions and interests. As a result, the planning process is cumbersome and discontinuous, with formation and approval times that are too long and uncertain with respect to the need for efficiency and competitiveness of port systems as advanced nodes in the logistics network.

The introduction of the “System Strategic Planning Document” (DPSS), the re-definition of the “Guidelines for the drafting of port system master plans”, the numerous investments in environmental quality and ecological transition (Next Generation EU), and the recent waterfront redevelopment programs, seem to have opened a new phase for port planning.

Article :

1. The proximity of Italian ports to urban centres

Anyport is a model developed in 1963 by Bird [1] describing port infrastructure typical evolution in time and space (*Figure 1*).

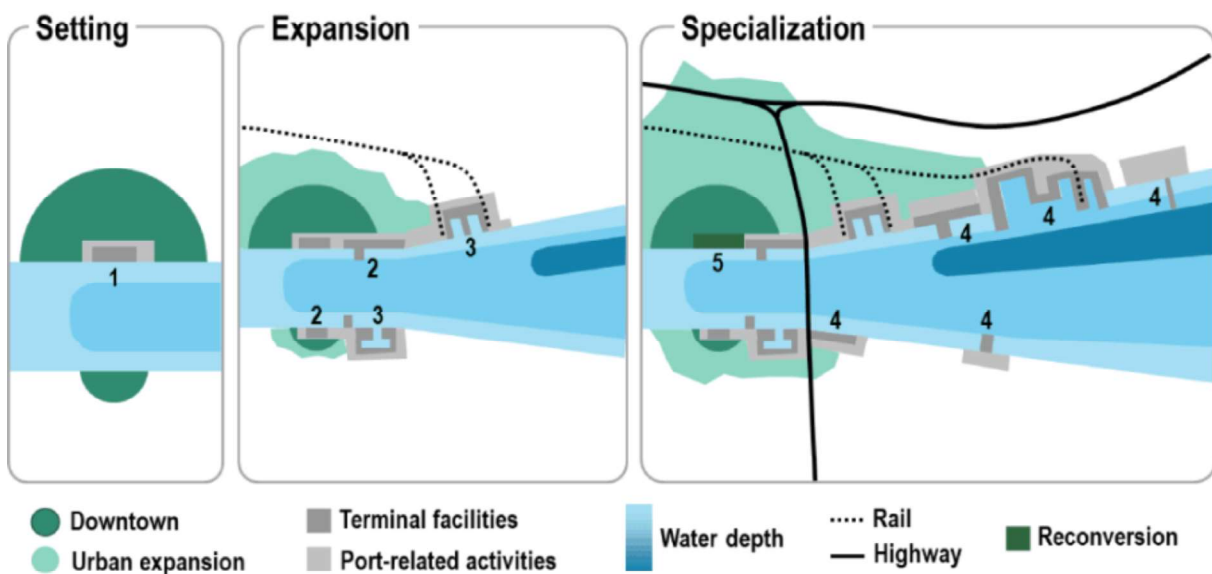


Figure 1 : “Anyport Model” (Bird, 1963 [1] – picture from porteconomicsmanagement.org)

Starting from the initial port site with small quays adjacent to the city center (stage 1), the setting up of wharves is the product of evolving maritime technologies and improvements in cargo handling (stage 2). The changing spatial relationships between the port and the urban core are underlined, as docks are built further away from the central district (stage 3). In the final stage, increased specialization of cargo handling, growing ship sizes, and ever-increasing demands for space for cargo handling and storage result in port activities being located at sites far removed from the oldest facilities (stage 4).

In turn, original port sites, commonly located adjacent to downtown areas, become obsolete and are abandoned. Numerous reconversion opportunities for port facilities to other uses (waterfront parks, housing, and commercial developments) are created (stage 5).

While in Europe ports have moved away from cities via subsequent processes of decentralization, in Italy, except for a few cases, ports have remained and expanded into the urban territory, often in the very heart of the ancient city (*Figure 2, 3*).

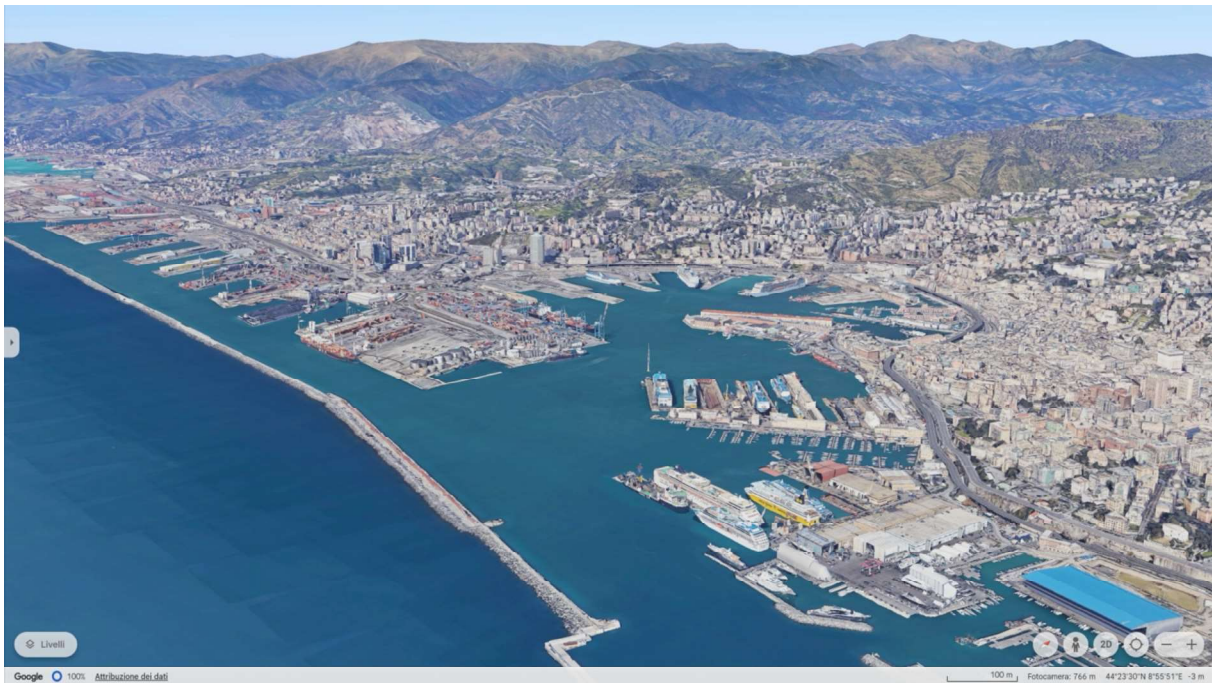


Figure 2 : Port of Genova

The proximity and co-presence of these two parts have resulted in a conflicting condition and a complex articulation of the regulatory system of port planning: on the one hand, the urban plan, and on the other, the port plan, often with opposing visions and interests.



Figure 3 : Port of Napoli

2. Italian legislation regarding port planning

In Italy, Law n. 84/1994 [2] has overall reorganized port legislation, introducing Port Authorities and transforming port plans from works programs into complex plans, based on a plurality of infrastructural, logistical, urban planning and environmental functions and relationships.

In the process of developing the port plan, an agreement was required between the port authority and the municipality. This institute did not become an effective moment of collaborative-planning. The approval times for the port plan proved to be too long compared to the competitive functioning needs of the ports.

A first attempt to give a homogeneous direction to the planning activities of port areas occurred in 2004 with the issue of the “Guidelines for the drafting of port master plans” [3] (updated in 2017) by the High Council of Public Works of the Ministry of Infrastructure and Transport. On this occasion, the division of the Plan into two distinct areas was introduced: the operational port in the strict sense and the areas of port-city interaction.

The distinction was important on a methodological level: it allowed us to focus attention on the functioning of the areas involved in the port’s logistical activities and at the same time to open the

discussion on the relationship with the city, also in the perspective of urban redevelopment programs and in particular of waterfront.

The creation of the latter is proceeding with difficulty in Italy. The separation between city and port remains, however there are interesting signs of innovation.

With Legislative Decree n. 169/2016 [4], the Technical Functional Adaptation (ATF) tool was introduced into the law to facilitate the implementation of programs to modernize port areas. The device has become an assiduous and recurring practice in the transformations of port areas. However, the constant use of ATF procedures indicates a condition of insufficiency of the current regulatory framework.

An important aspect that affects the country's port planning is the complex relationship between the State and the Regions (Title V of the Constitution of the Italian Republic). The governance of territory and ports falls within a sphere of concurrent legislation between the State and the Regions: the principles and general directions of national policies are assigned to the State, while the implementation of local infrastructural and territorial policies is assigned to the Regions.

The matter is complex and, in many ways, still undetermined, but this is where it will be necessary to intervene to define a framework of certainties in the skills and roles of the institutions involved. In this regard, the definition of a national framework plan for infrastructure networks is essential.

With Legislative Decree n. 169/2016 [4], a new organization for Italian ports was defined by establishing 15 (later 16) "port system authorities". Objectively too many, also taking into account that the system involves 58 ports. The new organization gives the Port Authority a territorial dimension that was previously completely absent. For this new context, a new tool has been foreseen: the System Strategic Planning Document (DPSS).

This is an important tool, to which the necessary attention has not been paid by local authorities, central institutions, economic and technical operators (in reality also the new "Guidelines for the drafting of Port Regulatory Plans of the Port System", issued in 2017 have neglected to delve into its contents).

Legislative Decree 232/2017 [5] assigns the DPSS the task of "identifying and delimiting the areas intended for strictly port and retro-port functions, the areas of port-city interaction and the last mile road and rail infrastructure connections with the individual ports of the system and the crossings of the center urban". Overall, a strategic commitment that will have a strong impact on the local infrastructure network and urban systems. The DPSS is not subject to Strategic Environmental Assessment (but a debate is open on this point, perhaps it would be more appropriate to move the strategic territorial environmental assessment to this level in order to lighten the procedures at local level).

Most likely it will be the DPSS that will become the key element of the new port planning (a necessarily integrated and shared planning that involves entire territories and different institutions and operators).

3. Port planning and town planning

A significant simplification of the port planning process has recently been introduced, assigning responsibility for the operational port plan to the Port Authority and the planning of the port-city interaction areas to the local authority.

In some cases, operational port areas may also have a port-city interaction function. For example, a maritime station has an operational function, even if located on the urban waterfront and accessible to citizens (*Figure 4*). DPSS should keep the facility within the perimeter of “port areas” covered by Port Master Plan, under jurisdiction of the Port System Authority.

In another case, a port area decommissioned and transformed into a housing complex, should be classified by DPSS as “an area with a port-city interaction function”, then removed from Port Master Plan and subjected to Town Plan.

A quay for pleasure boating, located on the edge of urban centre, is suitable for being assigned to both the jurisdiction of Port Plan and Town Plan; DPSS should identify which, between port and municipal planning, is the most suitable to guarantee a harmonious development of the quay with respect to the surrounding area.



Figure 4 : Port of Salerno

The orientation to simplify and recentralize the decision-making processes of the planning processes has been confirmed, with Legislative Decree 121/2021 [6], the port system authorities are now approving their plans, with an objective reduction in the role of local administrations. The legislative device is placed in the perspective of the “simplifications” Decree and the accompanying reforms of Next

Generation EU. This is an important step, the effects of which on territorial and urban planning have not been sufficiently evaluated.

4. Next Generation EU

Port planning intercepts the investment axes of Next Generation EU (intermodal and sustainable mobility, digitalisation, ecological transition...) [7]. In particular, investments aimed at improving the quality of the port environment (reduction of climate-altering emissions, water and air pollution, noise pollution, heat islands...) can produce positive effects in the relationship between port system and urban system, achieving greater environmental integration between the parts. The electrification of the docks and the use of electric motors are already moving in this direction.

In recent years, waterfront redevelopment works have been undertaken in many Italian ports (Figure 5).



Figure 5 : Port of Marina di Carrara – Waterfront under construction (rendering)

The greater environmental quality of the port makes its permanence in the city compatible, allowing an exchange of services, knowledge and opportunities. From a condition perceived as negative, the presence of the port in the urban system can be transformed into an added value that can increase the potential of port cities.

5. Conclusion and perspectives

Because of the new laws, High Council of Public Works is now updating its “Guidelines for the drafting of port master plans”, dating back to 2017.

Port planning is going through a phase of repositioning and reform: on the one hand it appears increasingly necessary to redefine the relationships between the State, Regions and local authorities, on the other it will be necessary to prepare a strategic reference framework for logistics and national ports, capable to guide the planning of local port systems.

In this context, the DPSS becomes the hub of the planning process: it is at this level that the strategic choices (political and technical) that impact the efficiency and social and environmental sustainability of territories in which the port systems are strictly intertwined with urban ones. Once the strategy is shared and the sustainability of the choices is verified, the planning of the individual ports will be able to develop with greater autonomy and timeliness.

[1] James Harold Bird, 1963. *The Major Seaports of the United Kingdom*, Hutchinson, London. – mentioned in porteconomicsmanagement.org.

[2] Italian Parliament, 1994. *Law 28 January 1994, n. 84, Reorganization of port legislation*. Roma.

[3] High Council of Public Works of the Italian Ministry of Infrastructure and Transport, 2014 (update 2017). *Guidelines for the drafting of port masterplans*. Roma.

[4] Italian Government, 2016. *Legislative Decree 4 August 2016, n. 169, Reorganisation, rationalization and simplification of the regulations concerning the port authorities referred to in law 28 January 1994, n. 84, implementing article 8, paragraph 1, letter f), of law 7 August 2015, n. 124*. Roma.

[5] Italian Government, 2017. *Legislative Decree 13 December 2017, n. 232, Supplementary and corrective provisions to the legislative decree of 4 August 2016, n. 169, concerning port authorities*. Roma.

[6] Italian Government, 2021. *Decree-law 10 September 2021, n. 121, Urgent provisions regarding investments and safety of infrastructure, transport and road circulation, for the functionality of the Ministry of Sustainable Infrastructure and Mobility, the High Council of Public Works and the National Safety Agency of the railways and of road and motorway infrastructures*. Roma.

[7] Italian Ministry of Sustainable Infrastructure and Mobility in collaboration with Assoport, 2022. *PNRR investments and reforms for ports*. Roma.

Ref. Author : Ayva Shahhat, International Association for Dredging Companies, shahhat@iadc-dredging.com Stationsplein 4 2275 AZ Voorburg, Netherlands

Mots clés/Key words : Dredging, Sustainable, Marine, Infrastructure, Inclusion externalities.

Integrating dredging in sustainable development

Résumé de l'article :

La mise en œuvre d'infrastructures hydrauliques impliquant le dragage, telles que le développement de terminaux de croisière, l'approfondissement de rivières, les mesures de défense contre les inondations et les poldérisations, a traditionnellement été une activité essentielle au développement et à la prospérité de la civilisation, et l'est en fait encore aujourd'hui. Toutefois, de par sa nature même, le dragage, qui consiste à extraire des matériaux du lit de la mer, d'une rivière ou d'un lac et à les déplacer ailleurs, a un impact sur l'environnement.

Cependant, des approches plus récentes dépassent le cadre des activités de dragage isolées et s'inscrivent dans un contexte plus large, en considérant les projets de développement d'infrastructures hydrauliques comme une opportunité d'ajouter de la valeur au système (naturel et socio-économique) afin de réaliser des projets plus durables.

Au cours des 10 à 15 dernières années, la communauté internationale du dragage a réellement adopté ce type de réflexion et l'approche du dragage a été transformée à bien des égards. D'une approche principalement axée sur les impacts négatifs, souvent à la fin de la conception du projet et au début de la phase de construction, on est passé à une approche beaucoup plus proactive où les projets d'infrastructures hydrauliques sont considérés comme faisant partie du système naturel et socio-économique dans lequel ils sont situés, et où les parties prenantes sont impliquées beaucoup plus tôt dans le processus de développement du projet afin de faciliter la recherche d'opportunités de création de valeur ajoutée.

Ce changement d'attitude a une influence considérable sur le lancement, la planification et la conception, l'exécution et l'entretien des projets d'infrastructure dans le domaine de l'eau. Jusqu'à présent, il n'y a pas eu de conseils détaillés sur la manière de mettre cela en pratique. La contribution de l'IADC à la conférence est liée à l'ouvrage *Dredging for Sustainable Infrastructure*, dans lequel un large éventail de professionnels ont tenté de rassembler et d'intégrer leurs expériences et leurs meilleures pratiques.

<https://www.iadc-dredging.com/publication/dredging-for-sustainable-infrastructure/>

Abstract:

Implementation of water infrastructure involving dredging, such as cruise terminal development, river deepening, flood defence measures and reclamations, has traditionally been an essential activity in civilisation's development and prosperity, and in fact still is. By its very nature, however, the act of dredging, with the excavation of material from the sea, river or lake bed and its relocation elsewhere, has an environmental impact.

Yet, more recent approaches look beyond the scope of isolated dredging activities and embrace a wider context, by considering water infrastructure development projects as an opportunity to also add value to the (natural and socio-economic) system in order to achieve more sustainable projects.

In the past 10-15 years, the international dredging community has really embraced this kind of thinking and the approach to dredging has in many ways been transformed. From mainly dealing with negative impacts, often at the end of the project design and the start of the construction phase, towards a much more proactive approach where water infrastructure projects are being considered as part of the natural and socio-economic system in which they are situated, and stakeholders are being engaged much earlier in the project development process to facilitate the search for opportunities to create added value.

This change in attitude has a huge influence on the initiation, planning and design, execution and maintenance of water infrastructure projects. Comprehensive guidance on how to bring this into practice has to date been lacking. The IADC contribution to the conference is linked to the book *Dredging for Sustainable Infrastructure* in which a wide range of professionals have attempted to collect and integrate their experiences and best practices.

<https://www.iadc-dredging.com/publication/dredging-for-sustainable-infrastructure/>

Article :

1. Introduction et enjeux / Introduction and aims

A dredge is a tool. For hundreds of years this tool has been used to shape and manipulate the interface between land and water in order to support a variety of human activities, including navigation, coastal protection, flood risk management, as well as residential, commercial, agricultural and hydro-power development. The use of dredging to achieve these purposes has always been guided by an understanding of the costs and benefits of applying the tool. However, in the last few decades the understanding of what constitutes costs and benefits has evolved substantially beyond the direct monetary costs of using the tool and the direct monetary benefits of what the tool was used to create. This evolution was aided by the environmental movement over the last 50 years, where the costs (in a broad sense) of applying the tool was expanded to include the negative environmental impacts that can be associated with dredging. Environmental regulations were put in place in an effort to minimise negative impacts on ecosystems caused by dredging activities, and for the last few decades dredging has been at the centre of a conflict, where the water meets the land, between groups supporting development and the environment. However, attitudes and approaches are changing

The International Association of Dredging Companies (IADC) aims to inform the world about the fundamental need for dredging as well as advocating for an industry that makes the world a safer, better and more sustainable place to live. IADC introduced this paper to present the concept of sustainability in relation to dredging projects. It describes the approaches and practices that are key to using dredging and dredged material to create more sustainable solutions and infrastructure – a modern way of thinking about dredging. The environmental regulations that have been put into place over the last 50 years to eliminate, reduce, or control the impacts of dredging on the environment, have produced a range of outcomes, both positive and negative. It is undoubtedly true that such regulations

have helped to reduce negative impacts on the environment, in general. However, it is also true that the amount of environmental benefit produced by these regulations has not been systematically quantified, nor have the environmental, social and economic costs of such regulation been fully assessed (e.g. related to trade-offs and transferring impacts within the system). Today, a paradigm shift is being embraced – a move toward a holistic approach for integrating values for people, planet and profit.

2. Article

2.1.2 The growing focus on sustainability

The international focus – An increasing amount of attention is being given to the concept of sustainability as an approach to informing social, environmental and economic development. In 2015, the United Nations (2015) published its SDGs, as a part of “The 2030 Agenda for Sustainable Development” These 17 SDGs encompass a very broad range of interests, values, and objectives.

As a means for developing water resources infrastructure, the relationship of dredging to each of the 17 SDGs varies. For example, the use of dredging to construct efficient and productive navigation infrastructure is directly connected to SDGs 2, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 14, and 15. As a tool used to provide coastal protection and infrastructure supporting flood risk management, dredging clearly supports SDGs 1, 3, 6, 9, 11, and 13, among others. In the future, one of the opportunities that should be **addressed by the dredging and water infrastructure community is to incorporate these goals into the** infrastructure development process, while effectively communicating how such projects support the SDGs.

The organisational focus – An example of organisational focus and application of sustainability in relation to dredging and infrastructure can be seen in the Environmental Operating Principles (EOP) of the United States Army Corps of Engineers (USACE). The USACE dredges approximately 250 million m³ of sediment annually (including permits for dredging issued through its regulatory programme). This level of dredging supports a network of nearly 40,000 km of navigation channel and the associated ports, in addition to flood risk management and ecosystem restoration projects. In 2002, the USACE developed and published its EOP, which were subsequently updated in 201.



World Organisation of Dredging Associations

**CENTRAL DREDGING ASSOCIATION
EASTERN DREDGING ASSOCIATION
WESTERN DREDGING ASSOCIATION**

WODA PRINCIPLES OF SUSTAINABLE DREDGING

Dredging and dredged material management are essential if we are to maintain and improve our quality of life and economic well-being. This is achieved through the creation and maintenance of water-based infrastructure by navigation dredging and reclamation; enhancing environmental quality by beach nourishment or environmental dredging to remove contaminated sediments; providing flood control; producing minerals and construction materials, and supporting offshore energy production, including renewable energy.

By adhering to principles of sustainability that include working with natural systems to integrate these actions, the goals of environmental quality and economic prosperity can both be achieved.

WODA's objective is to achieve sustainable dredging through implementation of the following principles:

1. From the start and throughout each stage of a dredging project, social, environmental, and economic objectives should be systematically considered and integrated.
2. Development of a project design should identify how to work with natural processes and the site-specific characteristics of ecosystems to achieve the project's objectives, including understanding of the carbon footprint of a dredging project.
3. Project proponents, regulatory authorities and the broad range of stakeholders should be engaged at the earliest conceptual stage in the development of dredging projects. Active collaboration in the development of projects is the key to achieving maximum social, environmental, and economic benefits.
4. Scientifically based criteria, performance guidelines and environmental safeguards for dredging and dredged material management are essential to provide clear directions to project owners, planners and executing companies.
5. Dredged material management should be based upon a holistic and systematic understanding of the ecosystem and natural processes. Beneficial use of dredged materials, such as placement of sediment to nourish shorelines or to enhance or restore wetland ecosystems/marshes and upland habitat, should be given priority.
6. Dredging can be a key solution for remediation and restoration at historically contaminated aquatic sites.
7. Analysis of monitoring and assessment information before, during and after project implementation provides a basis for effective and sustainable project management.

Through the application of these principles of sustainable dredging, WODA believes that dredging will contribute to sound solutions that improve our well-being and protect our aquatic environment for future generations.

Figure 1: WODA principles

These principles were developed and disseminated by USACE as a means of advancing its stewardship of air, water and land resources while protecting and improving the environment. These principles have been communicated within USACE and codified as a part of an agency regulation so that each of the more than 30,000 employees of the agency “understand his or her responsibility to proactively implement the EOP as a key to the Corps mission.” (Bostick, 2012). The USACE EOP recognise the relationship of infrastructure development to the three pillars of sustainability, the importance of considering the long-term, life-cycle implications of agency actions, and the essential need to openly engage the stakeholders and interests affected by its projects and programmes.

The sector-specific focus – In 2013, the dredging sector itself, through the actions of the World Organization of Dredging Associations (WODA) (which includes the CEDA, the Eastern Dredging Association (EADA), and the Western Dredging Association (WEDA)), published its principles of sustainable dredging (see Figure 1).

The WODA principles reflect the importance of using dredging to create value across the three pillars of sustainability, considering the system-view of projects, including the ecosystem and natural processes operating within the system, and the role of engaging stakeholders (including project proponents, regulators, and the broader array of interests relevant to a project). Publication of the WODA principles has sparked a range of discussions and actions within the dredging sector in efforts to seek a balance between the economic development that is supported through dredging and environmental considerations and regulation.

Also, the recently published technical report “Sustainable Ports: A Guide for Port Authorities” (PIANC, 2014), from the port sector illustrates this shift towards an integrated and sustainable approach. This guide is a joint report of The World Association for Waterborne Transport Infrastructure (PIANC) and International Association of Ports and Harbors (IAPH). It defines a sustainable port as “... one in which the port authority together with port users, proactively and responsibly develops and operates, based on an economic green growth strategy, on the Working with Nature (WwN) philosophy and on stakeholder participation, starting from a long-term vision on the area in which it is located and from its privileged position within the logistic chain, thus assuring development that anticipates the needs of future generations, for their own benefit and the prosperity of the region that it serves.”

With regards to sustainable dredging it states the following aims:

The Green Port goals related to sustainable dredging are primarily to keep the port’s nautical access open, clean and safe. At the same time, the goals aim to:

1. Manage integrated dredging activities to create opportunities for improving environmental quality and at the same time creating or enhancing ecosystems;
2. Manage dredged material according to the philosophy of minimising quantity, enhance quality, re-use with or without pre-treatment and long-term beneficial placement; and

3. Understand the local (and surrounding) environment and search for opportunities to use the natural processes including hydraulics, hydrology, geophysical, vegetation, benthos, etc. to maximise the efficiency of the dredging in both short and long-term.

2.1.3 Applying the concept of sustainability to water infrastructure development

The concept of sustainable development is based on the premise that the design for an action (in this case a development project that involves the use of dredging) will be informed by a full consideration of the values and costs of the proposed action across the three pillars of sustainability: society, environment and economy (see Figure 2).

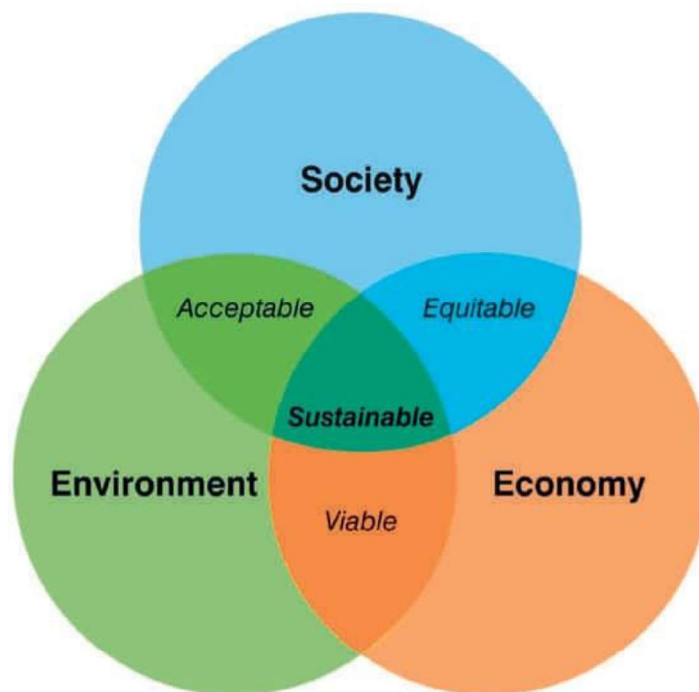


Figure 2: The three pillars of sustainability.

The concept of sustainable development recognises the need to consider the full range of benefits and impacts related to human actions and the distribution of these benefits and costs across the social, environmental and economic domains. The relationships among these value domains are reflected by the goal to take actions (e.g. develop projects) that will balance the distribution of benefits and costs so as to produce socially equitable, environmentally acceptable, and economically viable outcomes. This balance is achieved through active and consistent engagement with the stakeholders who will be

affected by the proposed project, including government authorities, private sector interests, local/regional/national members of the public, and the special interest groups and perspectives that are relevant to the project.

In order to aid our discussion of sustainability in the context of infrastructure development and dredging we propose the following operational definition (in line with the definition proposed by Brundtland et al., 1987):

“Sustainability is achieved in the development of infrastructure by efficiently investing the resources needed to support the desired social, environmental, and economic services generated by infrastructure for the benefit of current and future generations.”

Here, we use the word infrastructure to refer to the diverse range of structures, features, and capabilities that are developed through the use of dredging (e.g. navigation channels and waterways, ports and harbours, levees and dikes), and nature-based infrastructure such as islands, beaches and dunes, wetlands, reefs and many other forms of habitat. In practical terms, the sustainability of an infrastructure project is increased by:

1. Increasing the overall value of the project through the range of services it provides;
2. Reducing costs associated with the project, where the word costs is being used in the broadest sense to include all of the monetary and non-monetary (e.g. environmental impacts) costs and resources consumed by the activity; and
3. Balancing the distribution of the value and costs among the social, environmental and economic domains over time.

Some practical implications for dredging :

The importance of vision and value creation – For the vast majority of the history of dredging, the nearly exclusive focus of the activity was to generate the economic benefits produced by infrastructure. The incorporation of environmental and social factors (the other two pillars of sustainability) into the decision-making and governance process is a relatively recent development, mostly concentrated within the last 50 years. During the last few decades, significant technological and operational advancements have been made that have improved the dredging process in relation to the environment. That said, one of the biggest opportunities for increasing the overall sustainability of the water infrastructure sector is for project proponents, dredging contractors, and other stakeholders to invest more time and energy in up-front visioning to identify ways of creating more project value across all three of the pillars of sustainability. Such visioning will not diminish the importance of generating economic benefits from infrastructure, rather, it is more likely to reveal opportunities for creating additional economic value. By devoting more effort to identifying and developing positive social (e.g. recreational, educational, community resilience) and environmental (e.g. ecosystem services, habitat, natural resources) values, dredging and infrastructure projects will be able to avoid unnecessary conflicts with stakeholders while simultaneously developing a larger number of project proponents, advocates and partners.

Adapting projects to nature, rather than the reverse – Dredging is used to change or manipulate the physical structure of the environment to produce a feature or a function that nature did not and would not create on its own. For centuries, ports and waterway networks have been produced by creating a design for these systems and then imposing that design on the natural environment, with mixed results. Traditionally, designs were evaluated for their engineering performance and impacts on nature. Uncertainties related to performance and impacts were acknowledged to varying degrees. In the past, engineering was focused more on hydrology than ecology. In this historical approach, the engineering design and economic costs were dominant factors and effects on nature were secondary considerations. However, important lessons have been learned. Effects on nature and impacts in the coastal zone and rivers were underestimated or partly ignored in many cases. Lack of knowledge regarding sediment processes and the relation of these processes to local and regional geomorphology resulted in negative effects on engineering performance (e.g. higher than expected sedimentation in channels and reservoirs, erosion and scour around structures) and ecosystems (e.g. loss of habitat).

The ability to project long-term performance and effects was complicated by uncertainties. Hard structures, separating fresh and salt water and wet and dry areas (e.g. revetments, breakwaters, dams, walls, dikes etc.), were common engineering solutions, in order to manage the hydraulics. Rivers were trained and dams were built to facilitate navigation, manage high water and flooding, and generate energy. In many cases these solutions have disrupted sediment processes, which have given rise to long-term effects and current, ongoing engineering and ecological challenges (e.g. shrinking reservoir capacity due to sedimentation, shoreline erosion, loss of coastal landscapes and habitats, etc.). Past engineering projects have certainly delivered major economic, safety and human welfare benefits. As time has passed and the infrastructure projects have “begun to show their age”, the adverse effects associated with these projects have become more and more visible, casting at least a partial shadow over the realised benefits produced by their construction. In view of the processes, variability and extremes associated with climate change, there is renewed motivation to consider the long-term sustainability of water infrastructure.

Nature can be a stubborn and uncooperative collaborator when she is not adequately considered and consulted during the process of design. Winds, waves, and tides deliver force, water, and sediment against the products of our design with endless energy, which prompts us to spend our effort, time, and money reacting to nature’s onslaught. We have learned the lesson countless times that taming nature can be an expensive proposition. Integrating the concept of sustainability into our infrastructure projects will help us identify opportunities to cooperate and collaborate with natural processes, rather than seek to control and counter them. Working in this way we will adapt the port to the coastal ecosystem, the ship to the river, the local community to cycles of low and high water. PIANC’s WwN philosophy incorporates this approach to navigation infrastructure development and the Building with Nature (BwN) programme in the Netherlands (De Vriend and Van Koningsveld, 2012, www.ecoshape.org) and the Engineering with Nature (EwN)® initiative in the United States (Bridges et al., 2014, www.engineeringwithnature.org) are implementing these practices across a wide range of water infrastructure projects. The opportunity and need to more directly incorporate nature into our infrastructure development process can be viewed at two different levels: the scale of the system the project is part of and the means of constructing and operating the project. Our infrastructure projects

are part of a system (e.g. an ecosystem), and the projects will both affect and be affected by the processes operating within that system. The more we are able to take these processes into account over the full life-cycle of the project, the more sustainable the project can be. The more we use construction and operational methods, including dredging, that intentionally incorporate natural processes and materials, the more sustainable the project can be. The new nature-based design philosophies draw attention to the opportunity and need to enhance natural capital, over the short and long term. As the concepts, techniques and tools supporting ecosystem services are implemented as a part of infrastructure practice, we will be able to communicate about sustainability more effectively within our project teams and with the broader community of stakeholders interested in our projects.

Taking the long view – Water infrastructure projects, due to the amount of investment they require, are long-term propositions. While the state of scientific and engineering practice continues to advance, there will continue to be uncertainties regarding the behaviour of natural and engineered systems over the long-term. Nevertheless, pursuit of sustainable infrastructure requires taking a broad and long-term view of a project's life cycle. Taking this broad, system view is necessary in order to determine whether the project can be expected to be sustainable over the long term, i.e. that the total value of the project over the three pillars of sustainability is judged to be sufficient in relation to the investment required to create that value. Performing such sustainability analyses could mean that some proposed projects will not be built, or that existing projects will be decommissioned and abandoned in favour of more sustainable projects. Some ports or waterways, for example, which cannot be efficiently sustained over time due to the effects of physical processes, coastal conditions, sedimentation, environmental impacts, etc., would receive reduced levels of investment in favour of ports and waterways situated in a more sustainable condition. When investment decisions are being made on the basis of the overall sustainability of the project, then we will know that the concept of sustainability has been successfully incorporated into the governance of infrastructure systems.

Three guiding principles of dredging for sustainability :

Number 1. Comprehensive consideration and analysis of the social, environmental and economic costs and benefits of a project is used to guide the development of sustainable infrastructure – Dredging is but one component of an infrastructure project, and any one piece of infrastructure functions as a part of a larger network of infrastructure as well as the surrounding ecosystem. Therefore, understanding the full set of costs and benefits of a project requires taking a system-scale view of infrastructure and the functions and services that infrastructure provides. The costs (in the broad sense) of a project include all the resources, material, and negative impacts associated with executing the project and/or producing and operating the system over time. Likewise, the benefits generated would include all the values, services, and positive outputs generated by the project and/or system over time. Defined in this way, costs and benefits will include both monetisable and non-monetisable quantities. While traditional economic analysis can be used to develop an understanding of the more readily monetised costs and benefits, for other values within the social or environmental domains different methods should be used to develop credible evidence about costs and benefits. Finally, one of the key opportunities for increasing the overall sustainability of water infrastructure is to seek opportunities to

increase the total value of projects by identifying and developing benefits across all three of the pillars of sustainability.

Number 2. Commitments to process improvement and innovation are used to conserve resources, maximise efficiency, increase productivity, and extend the useful lifespan of assets and infrastructure – Innovations in technology, engineering, and operational practice provide opportunities to reduce fuel and energy requirements related to dredging and the operation of infrastructure. These same innovations can provide the means to reduce emissions (including greenhouse gases and other constituents) and conserve water and other resources. By reducing the consumptive use of resources associated with dredging and infrastructure the sustainability of projects is enhanced. In addition, using better technologies or improvements in operational practice in order to extend the useful lifespan and functional performance of an asset (e.g. a navigation channel, an offshore island that supports coastal resilience), in a manner that lowers overall life-cycle costs, will increase the sustainability of infrastructure.

Number 3. Comprehensive stakeholder engagement and partnering are used to enhance project value – Stakeholder engagement plays an important, even critical, role in the governance of infrastructure projects. The level of investment and sophistication employed in the engagement process directly contributes to the degree of success achieved through the engagement. Early investment in stakeholder engagement should be used to inform the conception and design of a project. Such engagement will provide important information about the values of interest to stakeholders and how those values can be generated by the project, in respect to the three pillars of sustainability. Furthermore, early engagement can help identify project partners who are interested in making contributions or investments toward particular values the project could produce (e.g. partnering with an NGO to perform ecosystem restoration as a part of the project). Pursued in this manner, stakeholder engagement can produce opportunities to increase the overall value of a project and to diversify the benefits produced across all three pillars of sustainability. This approach to stakeholder engagement is different to the historical use, which has been more focused on reducing conflicts over project costs, which in the context of this discussion includes the negative impacts associated with a project (whether social, environmental or economic). For example, stakeholder engagement has been used as a means to proactively engage environmental interests concerned about port infrastructure, flood protection and dredging in order to minimise the risk of project delays and litigation. The information and knowledge that is produced through active and robust stakeholder engagement provides a basis for increasing the overall sustainability of the project. When the information leads to actions that increase overall project value, sustainability is enhanced. When these actions lead to reducing total project costs (including all monetary costs and non-monetary impacts), while producing the same level of benefit, the result is a more sustainable project and system. Likewise, actions that increase project value (in terms of social, environmental, and economic benefits) for the same (or lower) costs result in a more sustainable project.

Traditionally, dredging projects have been focused on a narrow set of functions and outcomes (e.g. land reclamation, port basins and channels, coastal development, flood protection, pipeline trenches). A design was made and the effects on the environment and other functions were assessed, where

possible mitigated, and, if needed, compensated. Stakeholders entered the project process late, during the permitting stage, where they were informed about the design, with limited opportunity to influence the design. This approach has frequently led to conflicts, project delays and frustration, for the developer as well as stakeholders. Increasingly now, more and more projects are developed in a manner that is more inclusive of stakeholder perspectives. At first, the focus on stakeholders was driven by aims to reduce the risk of project delays and lengthy procedural conflicts, but more recently this approach has evolved to include the mind-set of co-creation. In this mode of stakeholder engagement, values are created not only with regard to the primary motivation for the project (e.g. a particular set of economic outputs), but also to address stakeholder interests and values. This approach leads to value-added design and innovation, which will produce projects that are beneficial in regard to people, planet and profit (Elkington, 1997).

3. Conclusion et perspectives/Conclusion and perspectives

Sustainability for dredging practice: from philosophy to action :

A dredge is a tool, an increasingly important tool for creating and sustaining value produced by water infrastructure. This paper has established the principles for integrating dredging in sustainable development. It outlined the philosophies and concepts of sustainability and their application to water infrastructure projects focusing on practical issues for dredging.

Dredging is connected to several SDGs, such as those related to navigation, coastal protection, and flood risk management. The dredging industry is increasingly recognizing the need to incorporate these goals into the infrastructure development process and communicate how projects align with the SDGs.

Climate change continues, energy transition is a fact, the growing world population calls for more sustainable cities and the need for food will increase. The demand for dredging will only increase, therefore, continuing with responsible dredging projects is key to sustainable development. The industry will continue to advocate for sustainability and promote dredging for sustainable infrastructure along with conducting more research on the topic to better projects that truly contribute the UN Sustainable Development Goals.

Bibliography

CEDA/IADC. (2018-10-29). *Dredging for Sustainable Infrastructure*. The Hague, Netherlands: Laboyrie, H. P., Van Koningsveld, M., Aarninkhof, S. G. J., Van Parys, M., Lee, M., Jensen, A., Csiti, A. and Kolman, R. (2018).



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

Projet d'extension du port de Port-La Nouvelle

Auteur principal : STEGA Roman – roman.stega@pln-port.com – SEMOP Port-La Nouvelle – 115 avenue Adolphe Turrel, 11210 Port-La Nouvelle – France

Co-auteurs : RINGLET Clémence – Ringlet.Clemence@deme-group.com – DEME / SDI – 251 Rue du Bois, 59130 Lambersart – France

Mots clés/Key words :

Transition énergétique
Eolien offshore flottant
Port de commerce
Aménagements portuaires
Dragage & Remblai
Développement

Energy transition
Floating offshore wind
Commercial port
Port facilities
Dredging & Embankment
Development



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

Résumé de l'article :

La Région Occitanie, depuis 2019, et la SEMOP Port-La Nouvelle depuis 2021, investissent massivement dans de nouvelles infrastructures portuaires, avec pour objectif la création d'un port capable de répondre aux stratégies de décarbonisation régional et national.

L'axe de développement majeur du port est la transition énergétique, le modèle économique du port est basé dessus :

- Développement des activités liées au secteur de l'éolien offshore flottant
- Développement d'activités liées à la filière de l'hydrogène vert
- Développement des activités liées aux tonnages généraux du port

La volonté du port est de participer à la structuration des filières émergentes comme l'éolien offshore flottant et l'hydrogène vert, et de contribuer la souveraineté énergétique française.

La Région a confié la gouvernance du port à la SEMOP (société d'économie mixte à opération unique).

La SEMOP regroupe des acteurs publics (49%) tels que la Région Occitanie et la Banque des Territoires (Caisse des Dépôts) avec Nou Vela, un groupe d'actionnaires privés (51%).

Port-La Nouvelle est le premier port français à être géré de manière privée.

Article's abstract :

The Occitanie Region, since 2019, and SEMOP Port-La Nouvelle since 2021, are investing heavily in new port infrastructure, with the aim of creating a port capable of responding to regional and national decarbonization strategies.

The port's major development axis is the energy transition, and the port's economic model is based on it:

- Development of activities linked to the floating offshore wind energy sector
- Development of activities linked to the green hydrogen sector
- Development of activities linked to the general tonnages of the port

The Region has entrusted the governance of the port to the SEMOP (mixed economy company).

The SEMOP brings together public actors (49%) such as the Occitanie Region and the Banque des Territoires (Caisse des Dépôts) with Nou Vela, a group of private shareholders (51%).

Port-La Nouvelle is the first French port to be managed privately.

1. Introduction et enjeux

Situé au Sud de Narbonne, Port-La Nouvelle est le troisième port français Méditerranéen, opérant chaque année un tonnage avoisinant les 2 millions de tonnes. Du fait de son positionnement géographique stratégique, ce port de commerce polyvalent intervient sur de larges filières : industrielles, agricoles et énergétiques. Le port manutentionne notamment des produits pétroliers, des céréales, des vrac liquides et des vrac secs ainsi que de marchandises conventionnelles et des colis lourds.

La Région Occitanie a confié l'aménagement, la gestion, l'exploitation et le développement du Port de commerce à une société d'économie mixte à opération unique SEMOP, par un contrat de concession de 40 ans qui a débuté le 1^{er} mai 2021.

La SEMOP est une structure inédite pour un Port de Commerce Français. Elle réunit les acteurs publics que sont la Région Occitanie et la Caisse des Dépôts avec un Consortium d'opérateurs privés, ce qui en fait le premier port Français sous gestion privative.

2. Article : Développement du port de Port-La Nouvelle comme Hub de la Transition Energétique

2.1 Présentation projet

Le projet d'extension du port de Port-La Nouvelle a pour ambition de développer les opérations maritimes actuellement en cours dans le port de commerce, de grandement diversifier et dynamiser les activités, et de se tourner vers le marché des énergies renouvelables.

La première étape, sous Maîtrise d'Ouvrage de la Région Occitanie, a débuté en 2019 et sera finalisée en novembre 2023. Elle consistait principalement en la construction d'une nouvelle digue Nord, et en l'allongement de la digue Sud existante. Ces deux bras permettent ainsi de définir un nouvel espace portuaire dont l'aménagement est le sujet des travaux en cours, sous la Maîtrise d'Ouvrage de la SEMOP.



Figure 1 : Projet d'extension du port de Port-La Nouvelle

Les travaux d'aménagement du nouveau bassin portuaire, constituant la seconde étape du développement sous Maîtrise d'Ouvrage SEMOP, comportent les infrastructures suivantes :

- La réalisation du poste P1 (vrac liquides), situé le long de la digue Nord,
- La réalisation du terre-plein Môle Marchandises, avec la réalisation d'un quai polyvalent de 450m de long,
- La réalisation du terre-plein Môle Vert, avec la réalisation d'un quai de 300m de long dédié aux activités générées par le développement des parcs éoliens flottants commerciaux,
- La réalisation d'un Parc Logistique portuaire, à proximité immédiate de l'espace maritime, et enfin
- Le dragage du bassin portuaire et des chenaux d'accès (approfondissement jusqu'à -15.9m pour le bassin, et -18.1m pour l'entrée du port).

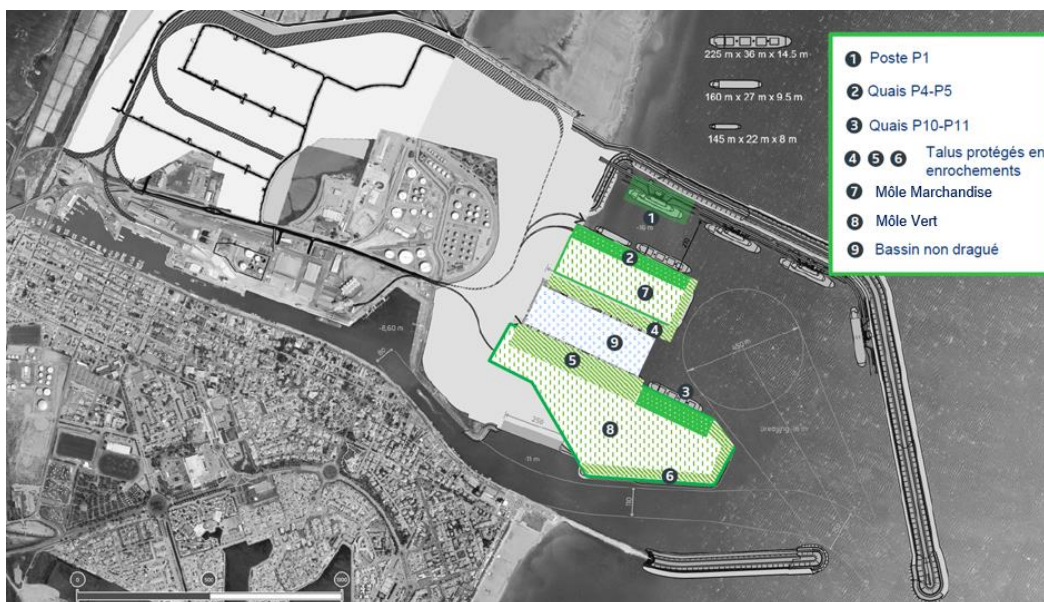


Figure 2 : Visualisation des infrastructures maritimes

La conception et la construction des travaux de cette seconde étape de l'extension du port ont été confiées au Groupement SDI – DEME Infra, tous deux faisant partie du groupe DEME. DEME est un acteur majeur dans la conception et la construction de projets maritimes, hydrauliques et d'ingénierie civile. Pour la partie conception, le Groupement s'est associé avec EGIS Port, expert en son domaine et acteur majeur des projets d'aménagement des ports, voies navigables et du littoral.

Le groupe DEME a une expérience mondialement reconnue dans le domaine des infrastructures maritimes et dans les projets de dragage & remblai. Le Groupement peut notamment compter sur la flotte du groupe DEME, composée de plus de 100 navires. Cette flotte innovante de navires de dragage et d'installation maritime est une des plus modernes au monde, autant sur ces capacités techniques qu'environnementales.

La livraison des premiers ouvrages prendra place fin 2024 : la plateforme remblayée du Parc Logistique, le Môle Marchandise (dont son linéaire de quai) et le dragage du bassin portuaire. Les

autres infrastructures seront elles mises à disposition de la SEMOP dès mi-2025, à savoir la jetée P1, suivie du Môle Vert.

2.2 Avancement des travaux actuels

2.2.1 Été 2022 – Décembre 2022

Dès la signature du contrat, le Groupement a débuté les études de conception – notamment par le biais d'une campagne d'étude de sol exécuté en été 2021. Les premières activités sur site ont eu lieu lors de l'été 2022, avec la construction des installations de chantier dans le périmètre du domaine portuaire.

Puis s'est suivi, fin octobre 2022, la première campagne de dragage avec la GANGA, une drague stationnaire à désagrégateur. Ce navire, d'une longueur de 75m, équipé d'une pompe lui permet d'aspirer le sable présent dans le fond marin à travers une tête rotative constituée d'ouvertures et de dents.



Figure 3 : Illustration du dragage à l'aide d'une drague stationnaire à désagrégateur

Le mélange d'eau et de sable est alors refoulé à terre, à travers un réseau de conduites flottantes et terrestres préalablement connectées. Ce volume a tout d'abord été utilisé pour créer un merlon d'enclosure tout autour de l'emprise du futur Môle Marchandise. Afin de protéger ce merlon sableux de l'érosion de la houle, une protection de deux types a été mise en place durant l'avancement de la construction : des palplanches *temporaires* ou des enrochements.



Figure 4 : Novembre 2022 – Construction du merlon d'enclosure, avec protection à l'avancement

La première campagne de dragage avec la drague stationnaire à désagréateur GANGA a permis de livrer fin 2022 de livrer la première parcelle du Parc Logistique, remblayée avec les matériaux dragués refoulés hydrauliquement.

Cette parcelle a pour objectif d'accueillir dès 2025 l'usine *Hyd'Occ*, une usine de production d'hydrogène vert avec une capacité à terme de 50MW.



Figure 5 : Fin 2022 – Première parcelle du Parc Logistique livrée à la SEMOP

2.2.2 Décembre 2022 – Été 2023

Fin décembre 2022, le merlon d'enclosure est finalisé, les opérations de refoulement des matériaux dragués peuvent alors directement prendre place à l'intérieur du Môle Marchandise, créant ainsi sa plateforme. Un volume supplémentaire est également refoulé sur la plateforme afin d'atteindre le degré de compaction nécessaire, en adéquation avec les charges portantes définies suivant la fonctionnalité de la plateforme (et de son futur quai).



Figure 6 : Mai 2023 – Plateforme du Môle Marchandise

Depuis juillet 2023 ont débuté les travaux de génie civil du quai polyvalent P4-5. Le mur de quai est constitué d'un rideau mixte dont le principe est schématisé ci-dessous.

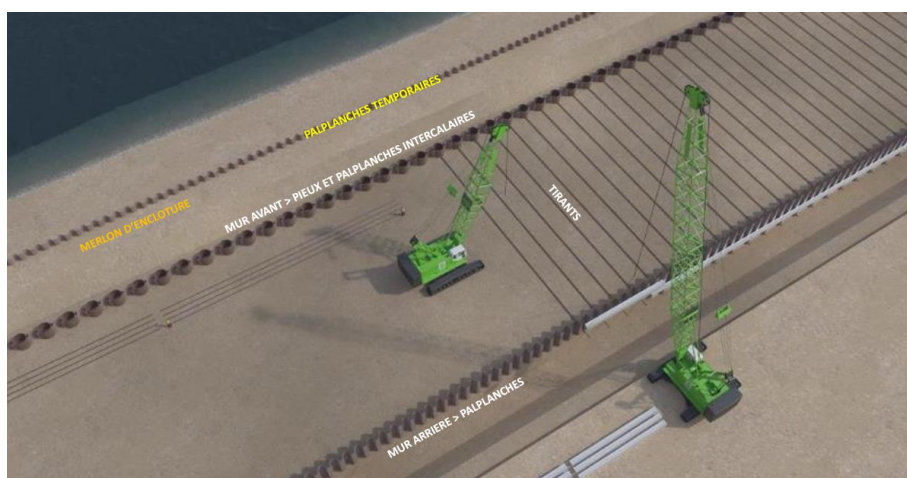


Figure 7 : Illustration du principe du 'combiwall' = 'rideau mixte'

Deux grues équipées d'outils spécifiques installent les pieux à profondeur définie, tout d'abord par vibrofonçage, puis suivie d'une opération de battage pour atteindre la côte finale.

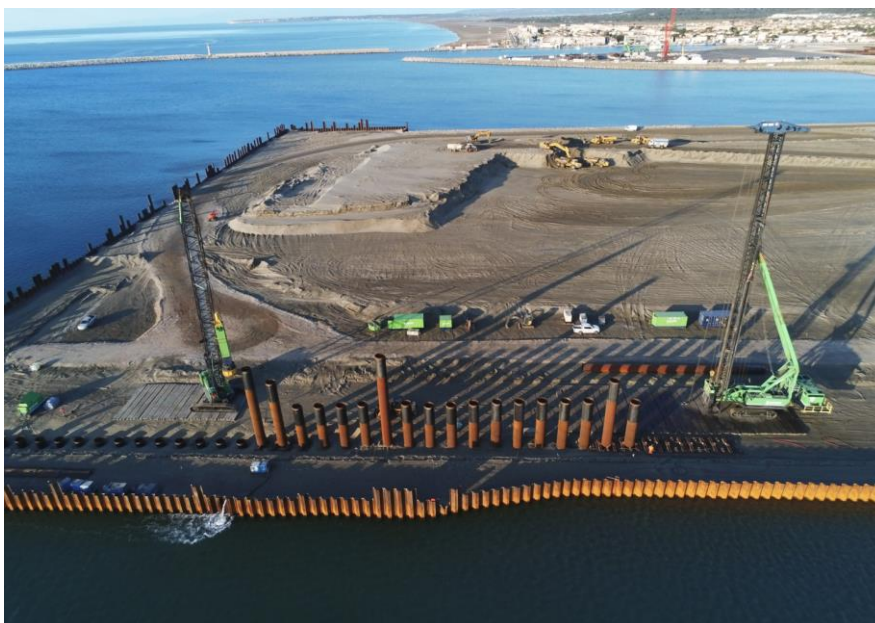


Figure 8 : Juillet 2023 – Installation des pieux par vibrofonçage par la première grue, suivie du battage à profondeur finale avec la seconde grue

Durant les mois de mai et de juin 2023, s'est réalisé dans le bassin en simultanée des travaux de génie civil maritime du Môle Marchandise, la première campagne de dragage avec la drague aspiratrice en marche NILE RIVER. Cette campagne a permis de réaliser un premier approfondissement de la passe d'entrée du port, destinée à atteindre les -18.1mZH. Les matériaux dragués ont cette fois été clapés en mer dans une zone dédiée, en conformité avec l'arrêté préfectoral en vigueur.



Figure 9 : Juin 2023 – Dragage d'approfondissement de la passe d'entrée du futur bassin portuaire avec le navire NILE RIVER

2.2.3 Ouvrages à construire à horizon 2024-2025

Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

Deux infrastructures maritimes restent à construire à ce jour : la jetée P1 et la plateforme du Môle Vert avec ses 300 mètres linéaires de quai. Les premiers travaux de remblai pour la réalisation de la plateforme du Môle Vert débuteront ce dernier trimestre 2023, la construction de la jetée commencera elle dès janvier 2025.

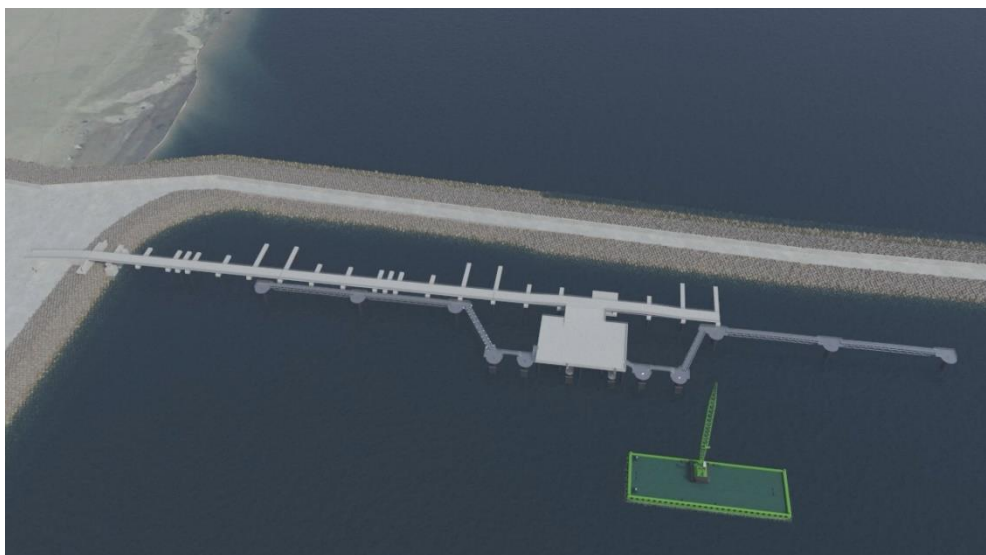


Figure 9 : Modèle virtuel de la future jetée P1, avec sa plateforme et différentes passerelles

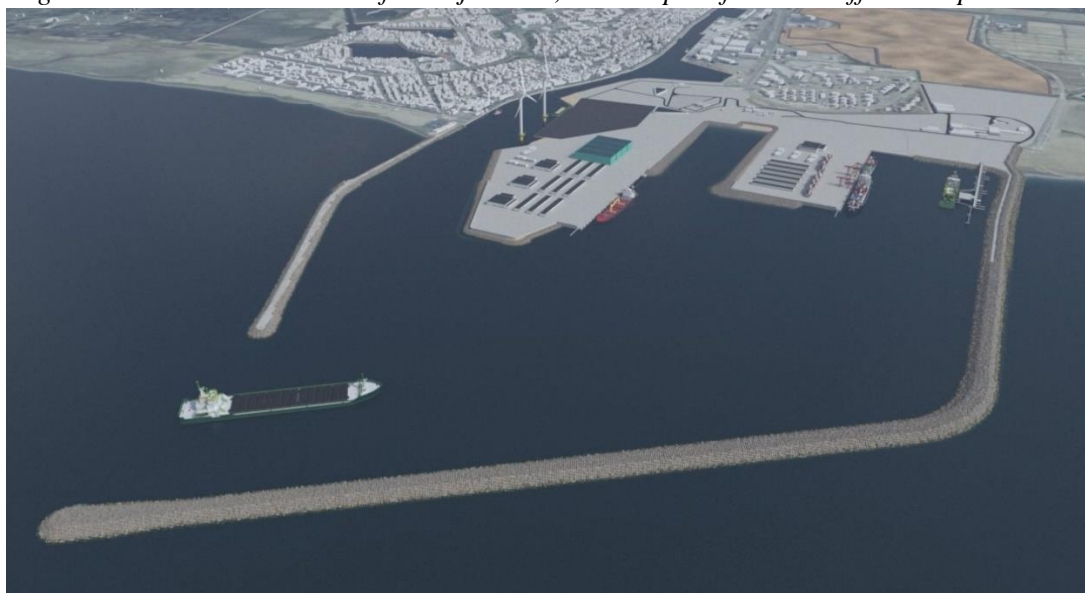
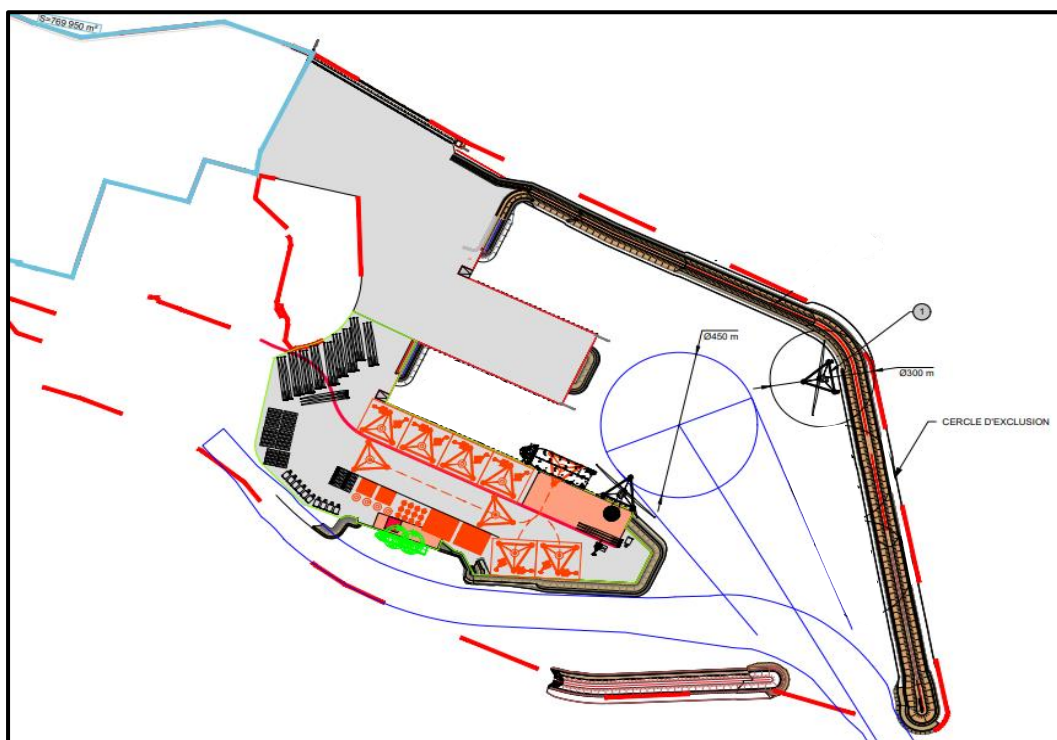


Figure 10 : Modèle virtuel des infrastructures maritimes à terme

3. Conclusion et perspectives

Ces nouveaux aménagements permettront au port de cibler un trafic de 6 millions de tonnes à horizon 2030, soit quatre fois plus qu'en 2021 (1,55 MT), avec un objectif à terme à hauteur de 12 millions de tonnes, entre 2040 et 2060. Une croissance portée en grande partie par les nouveaux produits verts (hydrogène, éoliennes, économie circulaire), qui devraient représenter la moitié du trafic. L'autre moitié sera constituée de colis lourds, hydrocarbures, biocarburants et vracs solides (céréales, minéraux, engrais, produits forestiers et cimentiers).

L'évolution des infrastructures portuaire de Port-La Nouvelle permettra de faciliter le déploiement des projets Eoliens Offshores Flottants à grande échelle. De la même manière, le port participe actuellement au développement de la mise en service de 2 des 3 fermes pilotes d'éoliennes flottantes françaises en Méditerranée, soit 60 MW au total et le port affiche pleinement sa volonté de participer au développement des futurs parcs commerciaux dès l'achèvement du nouveau du port à horizon 2026.





Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

Figure 11 : Exemple d'un schéma d'implantation d'un projet commercial d'éoliennes flottantes sur le port réalisé par la SEMOP Port-La Nouvelle.

Le port souhaite également se développer comme hub de l'hydrogène bas carbone en facilitant : son importation pour la France et l'Europe, sa production et son utilisation au sein du port et du territoire via notamment l'implantation de l'usine Hyd'Occ.

Les nouvelles infrastructures visent également le renforcement et le repositionnement de Port-La Nouvelle comme pôle pour vracs liquides et vracs solides. En effet, le développement ambitieux des infrastructures maritimes et ferroviaires facilitera l'exploitation de navires océaniques allant jusqu'à 60 à 80000 tonnes de port en lourd, et une connexion au Réseau Ferré National dans la continuité de l'objectif de décarbonation du port.

Enfin, l'augmentation du foncier permettra de répondre aux enjeux de réindustrialisation locales et nationales, tout en soutenant la structuration des filières émergentes et innovantes.



Ref. Author : Paolo Menegazzo and Mara Pitaccolo – North Adriatic Sea Port Authority. Ports of Venice and Chioggia paolo.menegazzo@port.venice.it; mara.pitaccolo@port.venice.it Santa Marta Fabbricato 13, Venezia, Italia

Co-authors : Andrea Pedroncini - DHI S.r.l - anp@dhigroup.com Via Bombrini 11/12 Genova, Italia.

Key words : Innovative design, navigation real time models, hydrodynamic / sediment transport models, resilient infrastructures, management solutions, optimization of port traffic, decarbonization of transport, port operational capacity, holistic approach, UNESCO site.

MALAMOCCO-MARGHERA NAVIGATION CHANNEL (VENICE LAGOON): STUDY OF OPERATIONAL AND STRUCTURAL SOLUTIONS TO ACHIEVE A SUSTAINABLE NAVIGATION

Résumé de l'article: Une étude approfondie et multidisciplinaire a identifié des solutions durables pour améliorer la capacité de navigation le long du canal Malamocco-Marghera, dans la lagune de Venise, tout en atténuant les processus d'érosion affectant les vasières entourant le canal, garantissant ainsi des conditions de navigation sécurisées. De plus, la recherche de synergies entre la durabilité portuaire et l'atténuation des impacts humains et liés au changement climatique sur les habitats en danger fait partie du défi. Les activités de l'étude ont été menées dans le cadre du projet européen "Channeling the Green Deal for Venice", financé par le CEF (Connecting Europe Facility), qui s'attaque à l'accessibilité nautique limitée du port de Venise, en respectant pleinement l'environnement et le site protégé par l'UNESCO de la lagune de Venise. Suite à des procédures d'appel d'offres public, le Port de Venise a attribué l'étude à un consortium dirigé par DHI S.r.l. et composé de DHI A/S, Force Technology, HS Marine S.r.l., Cetena S.p.A. et Around Water. Pour atteindre l'objectif ambitieux, une combinaison complexe et structurée de modèles de navigation et de modèles hydrodynamiques/transport de sédiments a été planifiée et mise en œuvre. Pour la première fois, les modèles d'hydrodynamique, de navigation en temps réel et morphologiques interagissent mutuellement pour identifier les meilleures solutions. Le développement des solutions de conception se déroule dans une série de besoins et de contraintes de nature différente : fonctionnelle, environnementale et économique, et implique des phases alternées d'étude et d'analyse des résultats avec des phases de confrontation avec la communauté portuaire. La phénoménologie la plus critique, c'est-à-dire l'onde de déplacement induite par le passage des navires, est en effet directement liée à la relation dimensionnelle entre la section du canal, la coque immergée du navire et la vitesse par rapport à l'eau. La première étape visait à définir l'étude appropriée de la géométrie du canal permettant d'assurer la sécurité de la navigation ; par conséquent, des simulations hydrodynamiques en 3D ont été reproduites, en mettant particulièrement l'accent sur l'onde de déplacement et son impact potentiel sur la réponse morphologique des vasières autour du canal. Après une quantification appropriée des contraintes de cisaillement du lit local dans les

différentes zones d'intérêt, des solutions de conception à grande échelle et locales visant à prévenir l'érosion des vasières et des rives du canal ont été identifiées. Le résultat est un cadre complet de solutions, à la fois infrastructurelles et axées sur la gestion, qui équilibrent les besoins environnementaux et les performances portuaires.

Article's abstract : A thorough and multi-disciplinary study has identified sustainable solutions to enhance navigation capacity along the Malamocco-Marghera Channel, in the Venice Lagoon, at the same time mitigating the erosion affecting the tidal flats surrounding the Channel, thus guaranteeing safe navigation conditions. Moreover, seeking synergies between port sustainability and mitigation of human and climate change impacts on endangered habitats is part of the challenge. The study activities have been carried out within the "Channeling the Green Deal for Venice", a CEF European funded project that tackles the limited nautical accessibility of the port of Venice, fully respecting the environment and the UNESCO protected site of the Venice Lagoon. Following Public Tender procedures, Port of Venice awarded the study to a Consortium led by DHI S.r.l. and formed by DHI A/S, Force Technology, HS Marine S.r.l., Cetena S.p.a. and Around Water. To achieve the ambitious goal, a complex and structured combination of navigation and hydrodynamic/sediment transport models have been planned and implemented. For the first time hydrodynamics, real time navigation and morphological models mutually interact to identify the best solutions. The development of the design solutions moves within a series of needs and constraints of different nature: functional, environmental and economic, and involves alternating phases of study and analysis of the results with phases of confrontation with the Port Community. The most critical phenomenology, i.e. the displacement wave induced by passing vessels, is in fact directly linked to the dimensional relationship between the section of the Channel, the submerged hull of the ship and the speed with respect to the water. The first step aimed at defining the proper study of the geometry of the Channel suitable for ensuring the safety of navigation; consequently, the 3D hydrodynamic simulations have been replicated, with special focus on the displacement wave and its potential impact on the morphological response of the tidal flats around the Channel. After proper quantification of the local bed shear stresses in the various areas of interest, both large scale and local design solutions aiming at preventing the erosion of the tidal flats and Channel banks have been identified. The result is complete framework of solutions, both infrastructural and operational, that balance environmental and port performance needs.

Article :

1. Introduction and aims

This advanced and multi-disciplinary study aims at identifying sustainable solutions to enhance navigation capacity along the Malamocco-Marghera Channel (hereafter MMC), in the Venice Lagoon, at the same time mitigating the erosion processes affecting the surrounding tidal flats, achieving and maintaining safe navigation conditions. Following Public Tender procedures, Port of Venice assigned

the study to a Consortium led by DHI S.r.l. and formed by DHI A/S, FORCE Technology, HS Marine S.r.l., Cetena S.p.a. and Around Water S.r.l.. The project activities fit into the “Channeling the Green Deal for Venice”, a CEF European funded project that tackles the limited nautical accessibility of the port of Venice, fully respecting the environment and the Venice Lagoon. Moreover, seeking synergies between port sustainability and mitigation of human and climate change impacts on endangered habitats is part of the challenge. To achieve this ambitious goal, navigation, hydrodynamic and morphodynamic models mutually interact to identify the best solution. This paper retraces the entire development of the study, offering a synthesis of the activities carried out over the course of more than a year of work.

2. Article

2.1 Establishment of a 2D meteomarine model of Venice Lagoon

The development of an integrated hydrodynamic and wave model capable of simulating the spatial-temporal distribution of the main meteomarine variables at lagoon scale is a prerequisite for the entire study's development. Following a complex and articulated phase of data acquisition and interpretation, a 2D model was developed covering the entire Venice lagoon area (*Figure 1*). The goal was to simulate, for an entire representative year, the spatial-temporal distribution of water levels, currents, and waves.

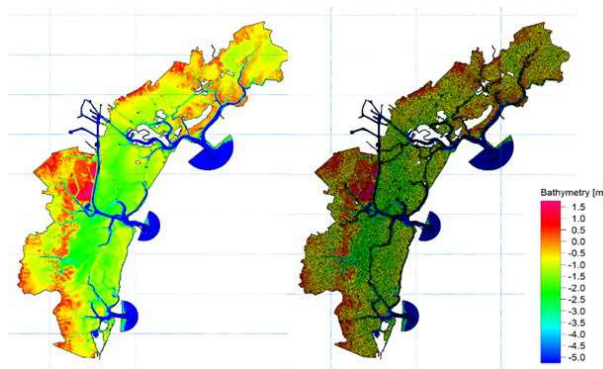


Figure 1 : Representation of the model bathymetry of the 2D model of the Venice Lagoon (on the left) and the adopted computational mesh (on the right).

The hydrodynamic model was developed using MIKE 21 HD (Hydrodynamics) by DHI. Boundary conditions of sea level at the three lagoon inlets were set based on the measurement from the Lido, Malamocco, and Chioggia stations. Meanwhile, wind conditions, varying both spatially and temporally, were constructed using available measurements. The wave model was implemented using MIKE 21 SW (Spectral Waves) by DHI, a flexible mesh third-generation spectral model. The distribution of water levels in the lagoon, varying in both space and time and essential for an accurate representation of wave generation, propagation, and dissipation, was directly derived from the hydrodynamic model's results.

The calibration of the hydrodynamic model was conducted by comparing the results of a test period (corresponding to a complete 14-day tidal cycle) with observed water level data from a series of tide gauge stations. Due to the very limited availability of wave measurements in the lagoon, reference was made to literature data for several Scirocco and Bora wave conditions (Carniello et al. [1]).

2.2 Navigation simulations

The tools used to simulate the "navigation" component are diverse, collectively aimed at quantifying the dependence of the operability of the MMC on meteomarine conditions (wind, tidal levels, currents, and waves). This particularly pertains to identifying critical sections or segments with regards to the risk of excessive reduction or annulment of Under Keel Clearance (UKC), as well as the risk of grounding with the Channel's banks or (in the infrastructured part beyond Fusina) with the quays. Activities related to "navigation" were jointly prepared by DHI and Force Technology and initially involved the application of the following scheme with respect to the current Channel configuration:

1. Quantifying the operability of the MMC (in reference to UKC) for selected vessel types under varying meteorological and marine conditions. Channel operability was calculated using DHI's Nonlinear Channel Optimization Simulator NCOS ONLINE in its UKC module. For each combination "vessel / load condition", 17,500 transits, spaced 30 minutes apart, were simulated throughout the entire representative year for which meteorological and marine conditions (wind, tidal levels, current, and waves) were generated along the Channel. For each transit, the model calculated the UKC and the so-called "Maneuvering Margin" (MM), following the guidelines of PIANC, 2014. While the UKC is closely linked to the risk of the keel touching the bed, the MM parameter indicates the potential presence of critical conditions for ship maneuverability. Both parameters represent the vertical distance between the keel and the bottom and are calculated based on the combined effect of waves, squat, and heel. The transit's operational criteria were set as shown in *Table 1*.

Parameter	UKC (m)	MM (m)
Transit operable	> 0.50 m	> 0.60 m
Transit Inoperable	< 0.50 m	< 0.60 m

Table 1 – Operability transit criteria applied in the study.

2. In-depth analysis of certain critical transits using Force's fast-time simulator, SimFlex, which also considers ship maneuverability. Among the main outcomes of the fast-time simulations, a noteworthy aspect is the frequent criticality (both for the bulk carrier and the container ship) identified at the San Leonardo bend (grounding example of the bulk carrier shown in *Figure 2*).

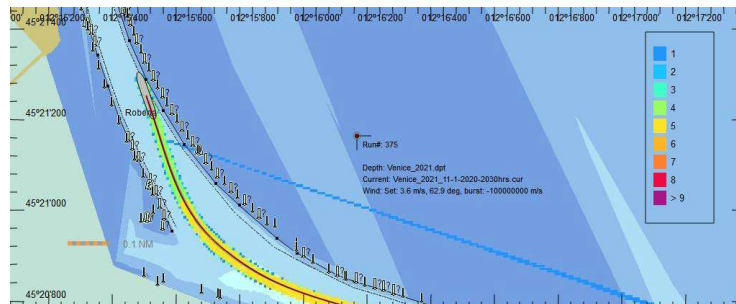


Figure 2 : The bulk carrier ship touches the bank at the San Leonardo curve.

3. Implementation of an extensive program of maneuver simulations with Force's "full-mission / real-time" simulator for a significant number of representative ships and various meteomarine scenarios. While "fast-time" simulations are executed via a numerical solver, "real-time" simulations, are conducted by an actual pilot guiding a virtual ship, with support from one or more bridge simulators at Force Technology's headquarters in Kgs. Lyngby, Denmark. "Full-mission" simulations, thus, take into account human behavior, providing realistic navigation responses along the Channel, especially in the presence of severe or critical conditions. Particular attention has been paid to navigation under wind conditions close to or more severe than the limits prescribed in the specific Ordinances of the Coast Guard. As a preliminary step to the maneuver simulations, a 3D visual environment was prepared to accurately reproduce the view from the ship's bridge during transit along the MMC. The 3D visualization database naturally considers all navigational elements (including buoys, piles, and lights) as well as landscape elements, including port infrastructures. *Figure 3* provides an example of the view offered by the 3D database of the MMC and its adjacent areas.



Figure 3 : Example of the view provided by the 3D database.

The results of navigation simulation activities in the current Channel configuration allowed, through subsequent iterations with hydrodynamic and morphodynamic modelling aimed at quantifying the effects of ship passage on adjacent shallow areas, a process of progressive optimization of the solution.

2.3 Modelling the effect of passing vessels

The effect of navigation on the hydrodynamics of the MMC and surrounding areas primarily deals with two types of waves induced by passing vessels: primary (draw down) and secondary waves (Kelvin wake). Primary waves are bound displacement waves induced by the acceleration of the flow under and around the vessel hull. The secondary wave system consists of diverging and transverse waves in a restricted wedge-shaped region around the vessel. In the MMC, primary waves showed greater importance than secondary (Kelvin) waves. Primary waves were simulated using a 3D hydrodynamic model (DHI's MIKE 3 HD FM) covering the MMC and surrounding areas. The passing vessel is simulated accurately as a moving pressure field boundary condition, where the pressure field is proportional to the draft of the vessel. The numerical model for simulating the draw-down, that has previously been successfully validated against physical model tests, was calibrated against wave data measured by CNR (August 2019 to February 2020) and against new wave data collected by HS Marine in a dedicated campaign. The hydrodynamic model showed an excellent ability to reproduce the level trend (with particular reference to the draw down, *Figure 4*).

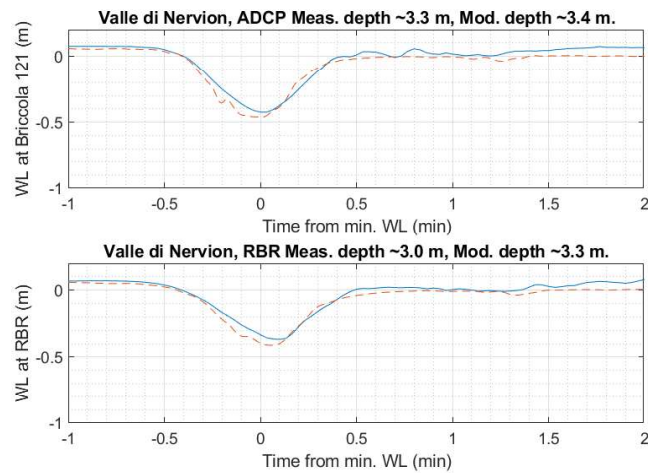


Figure 4 : Time series level comparison at two HS Marine gauging stations (May 2022) at the passage of the vessel Nervion Valley (an oil/chemical tanker) sailing from Marghera to Malamocco. The continuous blue line indicates the measurement, the dotted orange line the model result.

To determine the bed shear stresses induced by the displacement wave and to quantify the sediment resuspended and moved in the central lagoon, the hydrodynamic model was coupled with a sediment transport model, MIKE 3 MT by DHI. The transport model was implemented for three different particle size fractions: fine sand, medium silt and fine silt, characterised by d_{50} of 100, 40 and 15 μm , respectively. In the transport model, critical bed shear stress values for sediment suspension were assumed to be in the range between 0.5 and 1.8 Pa, based on what is available in the literature (Scarpa et al. 2019 [2], Saretta et al. 2010 [3], and Zaggia et al 2017 [4]).

2.4 Definition of operational solutions

The simulations of the effects of ship passage on hydrodynamics and sediment transport have highlighted that the navigation speed in the MMC is a primary factor in generating displacement waves that impact the lagoon morphology. A reduction in speed from 10 to 8 knots makes a difference in the conditions of erosion (bottom shear stress values higher than 0.5-0.7 Pa) and non-erosion of the shallow areas adjacent to the Channel, and therefore, it should be pursued as the ideal management solution.

2.5 Definition of structural solutions

The aim of the structural solutions is the optimization of the most critical Channel sections for navigation, the optimization of the channel geometry, also considering interventions on adjacent shallow areas, with the purpose of wave displacement dissipation, the implementation of new morphological structures in shallow areas (and/or modification of existing ones). Figure 5 shows a detail of the planned morphological structures alongside with local widenings of the Channel.



Figure 5 : Detail of the planned morphological structures to the right of the Channel (light green indicates the emerged part - salt marshes - while dark green corresponds to semi-submerged part).

2.6 Final validation of the proposed solutions

The proposed solutions (both operational and structural) were tested in a new round of full mission and hydro-morphodynamic simulations. In particular, the results of the latter, appropriately compared with the results from the current configuration, have highlighted a drastic reduction in the area affected by sea level variations during ship passage and the consequent decrease in shear stresses in the tidal flats. *Figure 6* presents maps of the maximum bed shear stress values induced by the passage of a "Large" Tanker ship, comparing the results obtained for the current layout with a navigation speed of 10 knots and those related to the project layout, with a navigation speed of 8 knots, local widening of the cross section of the Channel, and the presence of morphological structures.

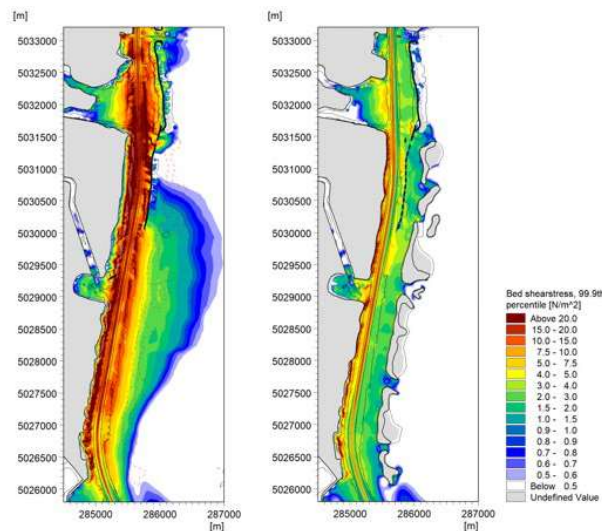


Figure 6 : Maps of maximum bed shear stress induced by the passage of a "Large" Tanker ship. Comparison between the current layout with a navigation speed of 10 knots (left) and the project layout with local widenings, a navigation speed of 8 knots and the presence of morphological structures (right).

3. Conclusion and perspectives

The study, which involved the synergic use of the most advanced technological tools available today for navigation simulations and hydro-morphodynamic simulations, has demonstrated that it is possible to ensure an increase in port operational efficiency and navigation safety while improving the environmental impacts of naval traffic along the Malamocco-Marghera channel. The proposed design, which includes a combination of operational and structural solutions, has encompassed:

- Localized adjustments to the channel geometry, with restoration of bottom levels as per the current Port Master Plan and specific local widening to enhance navigation safety.
- Construction of morphological structures in shallow areas that are fully integrated into the lagoon environment. These structures aim to restore morphological variability to a portion of the central lagoon and mitigate the residual effects of naval passage in the lagoon.
- Reduction of transit speed in the Channel, aimed at drastically minimizing the generation of disturbances induced by ship passage, primarily the displacement wave.

The combination of navigation simulations and hydro-morphodynamic models has on one hand verified the enhancement of port performance in terms of operations and navigation safety, and on the other hand, effectively reduced the effects of ship passage in the channel. This has resulted in a reduction of over 50% in the overall volume of erosion over an entire representative year of naval traffic.

4. Bibliography

- [1] L. Carniello, A. Defina, S. Fagherazzi e L. D'Alpaos, «A combined wind wave-tidal model for the Venice lagoon, Italy,» *Journal of Geophysical Research*, 2005.
- [2] G. M. Scarpa, L. Zaggia, G. Manfè, G. Lorenzetti, K. Parnell, T. Soomere, J. Rapaglia e E. Molinaroli, «The effects of ship wakes in the Venice lagoon and implications for the sustainability of shipping in coastal waters,» *Scientific Reports - Nature Research*, vol. 9, 2019.
- [3] A. Sarretta, S. Pillon, E. Molinaroli, S. Guerzoni e G. Fontolan, «Sediment budget in the Lagoon of Venice.,» *Continental Shelf Research*, vol. 30, pp. 934-949, 2010.
- [4] L. Zaggia, G. Lorenzetti, G. Manfè, G. M. Scarpa, E. Molinaroli, K. Parnell, J. Rapaglia, M. Gionta e T. Soomere, «Fast shoreline erosion induced by ship wakes in a coastal lagoon: Field evidence and remote sensing analysis,» *PLOS One*, 2017.



Journées Méditerranéennes - 24 au 26 octobre 2023 à Sete FRANCE- région Occitanie

Auteur principal: Chiara Minoretti – Bekaert – chiara.minoretti@bekart.com

NV Bekaert SA Bekaertstraat 2 8550 Zwevegem, Belgium

Co-auteurs:

Steven Pouillon – Bekaert – steven.pouillon@bekaert.com

NV Bekaert SA Bekaertstraat 2 8550 Zwevegem, Belgium

Kadir Aktas – Bekaert – kadir.aktas@bekaert.com

NV Bekaert SA Bekaertstraat 2 8550 Zwevegem, Belgium

Mots clés : chaussées portuaires, fibres d'acier, dallages en béton, SFRC, durabilité, soutenabilité

Titre: Chaussées portuaires durables : utiliser moins pour plus longtemps grâce aux fibres métalliques

Résumé:

Les chaussées portuaires sont un élément crucial des opérations des ports; ils doivent résister des charges et des usages différents et supporter toutes les activités à réaliser dans le port pendant une période donnée.

Pour cette raison, il est important d'équilibrer les exigences et les conséquences (techniques et financières) à court et à long terme lors de la conception d'un dallage portuaire.

Le choix du type de chaussée (asphalte, béton non armé, béton armé de façon conventionnel, béton armé avec des fibres d'acier, blocs en béton, etc.) est crucial, notamment dans une perspective de durabilité.

De plus en plus, les autorités portuaires et les utilisateurs des plateformes portuaires sont préoccupés par leur empreinte écologique, étant que la durée de vie et l'impact des réparations ne peuvent pas être sous-estimés.

Le béton renforcé avec des fibres d'acier est une solution très compétitive, en particulier lorsque l'accent est mis sur la flexibilité, la durabilité, la facilité d'utilisation et la robustesse combinées à une utilisation efficace des matériaux et à une maintenance réduite.

En particulier, la durabilité est augmentée principalement en raison des propriétés mécaniques améliorées de cette solution, telles que le comportement à la fatigue, la résistance aux impacts du matériau et une capacité de charge plus élevée.

Des variantes récemment développées sur des dallages en béton armé avec les fibres d'acier, dans lesquelles des renforcements traditionnels ou des câbles (post-tendus) sont combinés avec des fibres d'acier, permettent réduire ou même complètement éliminer tous les joints sciés.

Considérant que les joints sont toujours la partie la plus faible du dallage et, dans de nombreux cas, la cause de besoins d'entretien intenses, leur omission entraîne une augmentation significative de la durée de vie.

Dans cet article, les auteurs décrivent les aspects techniques de l'utilisation de fibres d'acier dans les dallages et les comparent avec d'autres systèmes de dallage couramment utilisés.

Dans l'article ils sont expliqués les dernières approches pour évaluer le comportement à la fatigue du béton renforcé avec des fibres en acier et comment celles-ci affectent la conception. En plus elle est considérée la possibilité de combiner le béton renforcé avec des fibres d'acier avec d'autres systèmes de renforcement et les avantages supplémentaires qui en résultent.

Les conclusions des auteurs sont que le béton avec des fibres d'acier est un matériau bien établi - les normes nationales et internationales le confirment - et qu'il augmente considérablement la durabilité et la soutenabilité d'un dallage sans augmenter le coût global.

Une combinaison de fibres d'acier avec des renforcements conventionnels ou des câbles post-tendus augmente encore plus les avantages apportés par cette solution.

1. Introduction:

Des technologies innovantes sont introduites et perfectionnées à l'échelle globale pour assurer la durabilité dans la construction en béton. De nombreux projets de recherche et développement sont en cours dans toutes les régions du monde pour fournir de nouveaux produits et systèmes de construction intégrant la durabilité

dans des applications réelles. Les fibres métalliques font partie intégrante de ces projets, car elles permettent de transformer des systèmes de construction existants en des nouveaux systèmes améliorés. Les fibres métalliques se prêtent également très bien à être utilisées en combinaison avec d'autres systèmes qui peuvent encore plus améliorer leurs propriétés, tels que les bars de renforcement traditionnels et les câbles de post-tension.

En particulier, le nouveau système SigmaSlab® améliore les propriétés de deux matériaux qui contribuent à une plus grande durabilité en combinant le béton renforcé avec des fibres d'acier avec la post-tension.

L'article se concentre sur le fonctionnement de ce nouveau système de dallage SigmaSlab® et sur la manière dont il offre des avantages environnementaux et autres, tels que des dallages plus minces et des quantités d'acier réduites, ainsi qu'une construction plus rapide et plus agile. L'un des avantages majeurs de ce système est qu'il permet une plus grande distance entre les joints de dilatation, de l'ordre de 100 à 150 mètres, sans qu'il soit nécessaire de scier les joints.

L'article comprend des comparaisons du point de vue des émissions de CO₂ liées aux différentes solutions.

Pour conclure les auteurs décrivent le projet du dallage portuaire du port de Costanta South Terminal, réalisé avec succès entre août 2022 et mars 2023 avec des fibres métalliques Dramix 5D.

2. Béton armé avec des fibres en acier :

Pendant la phase de fissuration du BRFA, les fibres d'acier présentes dans la matrice en béton comblent les fissures et transfèrent les contraintes à travers elles au cours de ce processus (Figure 1). Cela conduit à une ductilité accrue, à une dissipation d'énergie majeure et à une résistance aux fissures du béton, ainsi qu'à une capacité portante après fissure. Le BRFA avec des dosages commerciaux normaux de fibres d'acier n'entraîne pas une augmentation considérable de la résistance à la flexion (module de rupture) du béton, mais contribue à augmenter la ténacité du béton lorsque la résistance à la flexion post-fissuration du BRFA est assurée. Ce comportement est particulièrement utile dans certaines applications où le degré d'indétermination statique est élevé et où les fibres d'acier contribuent à redistribuer efficacement les contraintes.

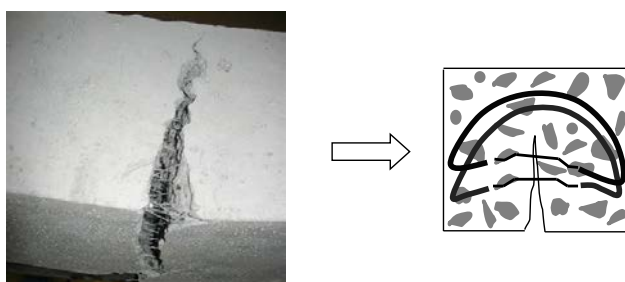


Figure 1 : transfert de contrainte à travers la fissure

Le comportement du BRFA est déterminé à l'aide d'un essai de flexion de poutre appuyée sur trois points selon la norme EN14651, comme illustré dans la Figure 2. Selon le type de fibre et le dosage, un phénomène écrouissant ou adoucissant en flexion est observé après la première fissuration ou quand la charge maximale est atteinte dans la poutre. Ceci contraste avec le béton sans renforcement (blanc), où un mode de rupture fragile soudaine se produit une fois atteinte la charge maximale.

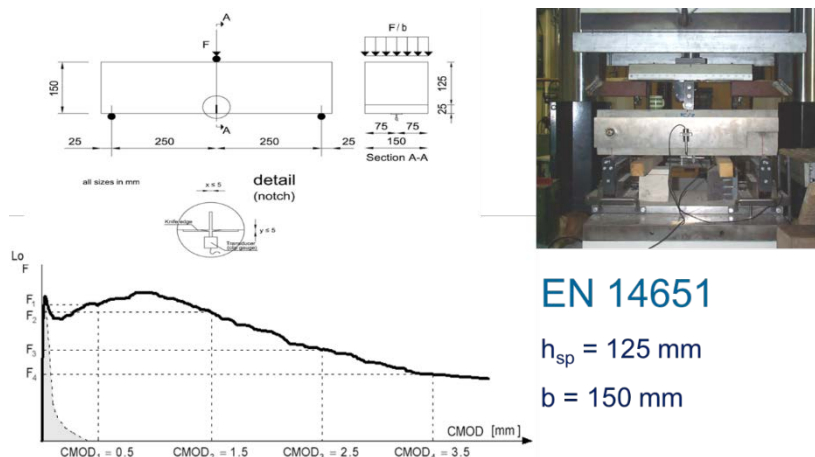


Figure 2 : comportement du BRFA- essai de flexion sur trois points (EN 14651)

L'un des principaux objectifs de la conception de structures est de fournir des modes de rupture ductile prévisibles et d'éviter des modes de rupture fragiles inattendus. En d'autres termes, la première fissure dans le système structurel ne doit jamais être la dernière.

3. Cadre réglementaire

Les fibres d'acier sont une solution très reconnue en termes de normes et de standards.

En fait, le nouveau Eurocode FprEN 1992-1-1:2022 fait référence aux fibres d'acier comme une solution possible pour remplacer le renforcement traditionnel et dédie le annexe L au BRFA.

L'annexe L dédie une partie a la classification des bétons renforcé avec des fibres métalliques par classes de performances et une autre partie aux formules pour pouvoir calculer des structures avec le BRFA.

Il faut souligner qu'aucune autre fibre est traité dans le Eurocode comme matériel pour substituer le renforcement traditionnel et en particulier pas les fibres polymériques qui, comme souligné dans le Model code, ont un module d'élasticité E qui est significativement affecté par le temps ou phénomène thermo hygrothermique (Figure 3 et 4).

	Concrete	Dramix® steel fibres	Synthetic fibres
Young's modulus	30,000 MPa	210,000 MPa	3,000–10,000 Mpa
Tensile strength	1–2.5 MPa	1,000 – 2,300 MPa	200–600 MPa
Loss of mechanical performance		> 370°C	> 50°C
Melting point		1500°C	165°C
Creep		> 370°C	At all temperatures

Figure 3 : Comparaison des matériaux entre le béton, les fibres d'acier Dramix et les fibres synthétiques

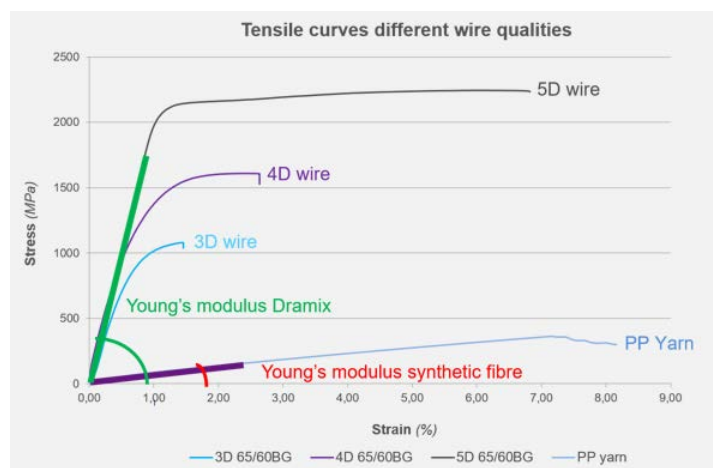


Figure 4 : Module E- Les fibres synthétiques sont moins rigides que le béton (module de Young plus faible)

Il est également important de préciser que les normes et directives spécifiques aux dallages portuaires, comme le rapport du Pianc 165 ou l'édition de l'association portuaire britannique Interpave, ne font référence qu'aux fibres d'acier.

En particulier, dans le rapport du Pianc, des facteurs de réduction de l'épaisseur et d'augmentation de la distance entre les joints sont déterminés à partir des valeurs de f_{R1} et f_{R3} du BRFA (Figure 5 et 6).

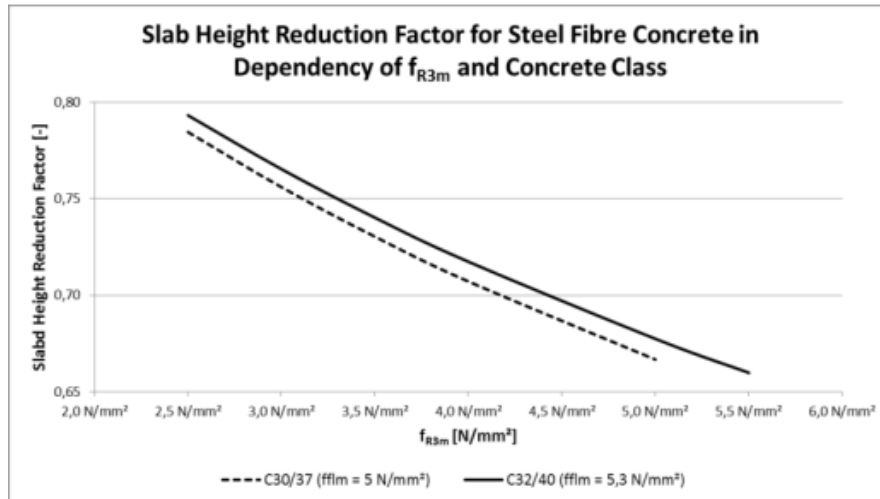


Figure 5 : Facteur de réduction d'épaisseur basé sur la valeur de f_{R3}

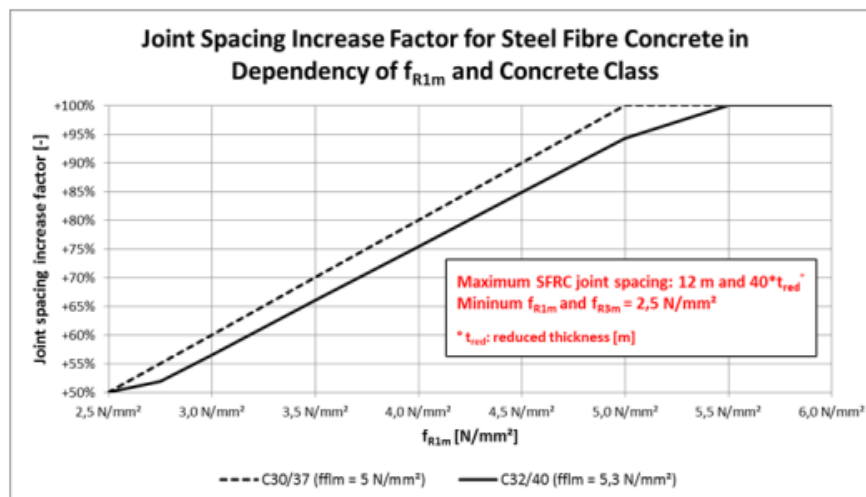


Figure 6 : Facteur d'augmentation de la distance entre les joints en fonction de la valeur de f_{R1}

4. Comportement aux chocs et à la fatigue

Les dallages en béton avec des fibres d'acier conservent à la fois les propriétés de service et la capacité portante même à l'état fissuré, permettant d'appliquer des charges plus élevées et des dalles plus minces sans modifier la capacité portante.

De plus, la résistance aux chocs est améliorée et la résistance aux fissures est augmentée par rapport au béton sans renforcement (blanc).

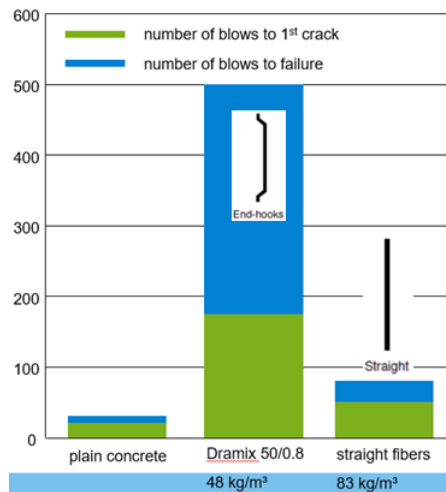


Figure 7 : Résistance aux chocs du béton sans renforcement, du béton avec des fibres avec ancrages et du béton avec des fibres droites (Source Unctad)

La résistance aux chocs des fibres avec ancrages aux extrémités est jusqu'à 5 fois supérieure à celle du béton sans renforcement.

Pour cette raison, le BRFA est utilisé pour réaliser des éléments tels que des pieux battus, des galeries, des structures de confinement, des sites d'enfouissement, des abris, des bunkers et d'autres éléments de protection.

Dans la Figure 8, il est possible d'apprécier la réalisation à grande échelle d'un bâtiment de confinement pour une explosion qui pourrait provenir d'un processus de production chimique réalisé à l'intérieur en Autriche en 2005.



Figure 8 : Conception et essaie à grande échelle d'un conteneur en béton antidéflagrant avec fibres d'acier

Une autre propriété importante qui est augmentée par rapport au béton massif grâce à l'utilisation de fibres métalliques est la résistance à la fatigue et c'est un aspect crucial pour les dallages portuaires, étant donné que les charges sont souvent lourdes et les vitesses faibles et cela implique des efforts importants en termes de stress et fatigue.

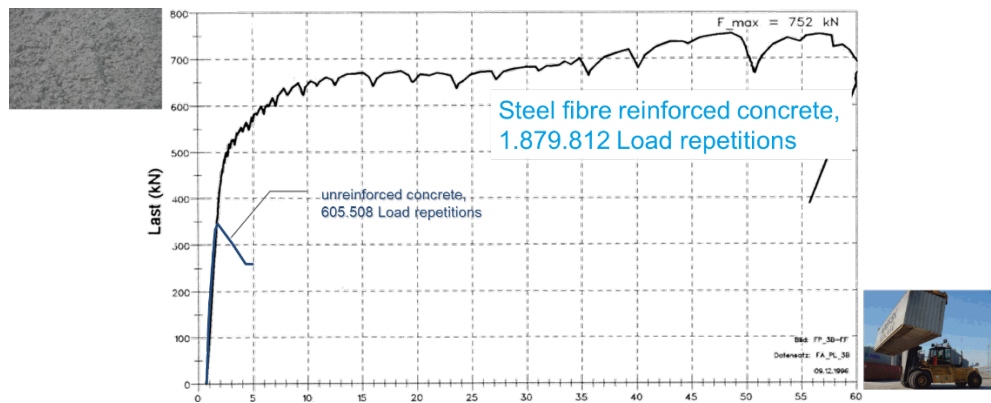


Figure 9 : Résistance à la fatigue du béton blanc par rapport au BRFA - cycles de chargement et de déchargement

5. Systèmes de dallage avec fibres métalliques

Ces dernières années, différents types des dallages avec des fibres métalliques ont été développés pour profiter des propriétés des fibres, en les combinant éventuellement avec d'autres matériaux pour des avantages opérationnels encore plus potentiels (temps d'exécution, risque d'accidents, réduction des joints, etc.) et en termes de durabilité (moins d'épaisseur et utilisation de matières premières).

Les principales solutions habituellement utilisées dans les dallages portuaires sont :

- Chaussées avec joints (sciés) renforcés uniquement avec des fibres métalliques : ils sont conçus aux ELU, les joints de dilatation sont généralement placés à une distance maximale de 6 m et comportent généralement des goupilles dans le sens longitudinal ;
- Chaussées sans joints de dilatation ou de construction (seamless) avec fibres combinées à des armatures traditionnelles dans la partie supérieure de la dalle : le dallage est conçu pour les ELU (charges) et les ELS (fissures). Les fissures ne peuvent pas être évitées, mais une fois qu'elles apparaissent, elles peuvent être calculées et contrôlées (généralement 0,2 mm).
- Système Sigmaslab®, qui consiste en la combinaison de fibres métalliques avec des câbles post-tendus.

5.1 Sigmaslab

Ce système innovant, SigmaSlab®, consiste en un système de renforcement qui comprend une combinaison de renforcement avec des fibres d'acier et de la post-tension adhérent ou non dans le béton. La quantité requise de fibres d'acier, déterminée par la conception structurelle, est introduite dans la matrice du béton avec d'autres composants tels que le ciment, le sable, les granulats, les adjuvants et l'eau lors de la préparation du mélange. Alternativement, les fibres peuvent être ajoutées au mélange sur place juste avant le coulage. Le mélange fourni est coulé (ou pompé) à l'endroit où un système de câbles a déjà été installé selon l'espacement requis et le profil de conception avant le coulage du béton. Par la suite, lorsque la résistance à la compression suffisante du béton est atteinte, l'activité de post-tension des câbles est réalisée pour transmettre des forces de compression dans la section de chaussée.

Les principes de comportement des matériaux et les caractéristiques de l'acier de post-tension sont complètement différents de ceux du renforcement en fibres d'acier. L'acier post-tendu est un renforcement continu fourni à une profondeur de section donnée ou profilé à différentes hauteurs dans la section de béton, tandis que le renforcement avec des fibres d'acier est un renforcement tridimensionnel constitué d'un vaste réseau d'éléments individuels de fibres d'acier dispersées de manière aléatoire dans toute la section de béton, fournissant ainsi un effet de confinement.

Alors que la post-tension fonctionne sur le principe d'augmenter la "première" résistance à la fissuration du béton en introduisant une pré-compression dans la section, augmentant ainsi le seuil de fissuration de la section, le renforcement par fibres d'acier fonctionne sur le principe de conférer au béton une résistance résiduelle après fissure, transférant la contrainte à travers la pointe d'une fissure qui peut apparaître. Ainsi, les deux systèmes de renforcement semblent fonctionner en termes opposés et se compléter ; l'un veut que le béton se fissure pour s'activer (fibres d'acier) tandis que l'autre ne veut pas du tout que le béton se fissure (post-tension).

La post-tension est une méthode dans laquelle la force de précontrainte est appliquée après le coulage du béton, d'où le terme béton « post-tendu ». Le principe du béton post-tendu est simple, il repose sur la capacité du béton en compression et compense la faiblesse du béton en traction en mettant le béton en compression avant d'appliquer les charges extérieures pour compenser les effets de la tension.

En fonction des exigences de conception, les forces de post-tension peuvent compenser totalement ou partiellement les contraintes de traction qui seront appliquées au béton pendant le service, que la contrainte soit due à un chargement axial, à un chargement de flexion ou à une combinaison de ces contraintes. Lors de la compensation de la tension, la charge seuil à laquelle se produit la première fissure est augmentée, la charge de fissuration doit dépasser la capacité de traction du béton plus l'effet de compression conféré par la post-tension. L'application de la force de post-tension s'effectue par mise sous tension de l'acier à haute résistance inséré dans le béton et maintenu en place par des câbles de post-tension. Toute conception structurale doit être réalisée à l'État limite ultime (ELU) et à l'état limite de service (ELS). Le premier est lié à la capacité portante dans des conditions ultimes, tandis que le second est lié à l'ouverture des fissures et au contrôle des déformations qui sont acceptables dans des conditions de « service ». La combinaison du BRFA et de la post-tension offre des avantages dans la conception en ELU et ELS. Dans les ELU, il permet de concevoir des sections de dalles plus minces capables de résister à des charges d'effondrement extrêmes, tandis que dans les ELS, il permet de concevoir de grandes dalles sans joints qui peuvent être conçues pour de très petites largeurs de fissures.

6. Comparaison environnementale

Du point de vue environnemental, les solutions à base de fibres d'acier s'avèrent plus avantageuses que d'autres systèmes.

Cela est principalement dû au fait qu'avec les fibres, la quantité de béton et d'acier dans un projet est optimisée et réduite, permettant une construction plus rapide par rapport aux systèmes plus traditionnels.

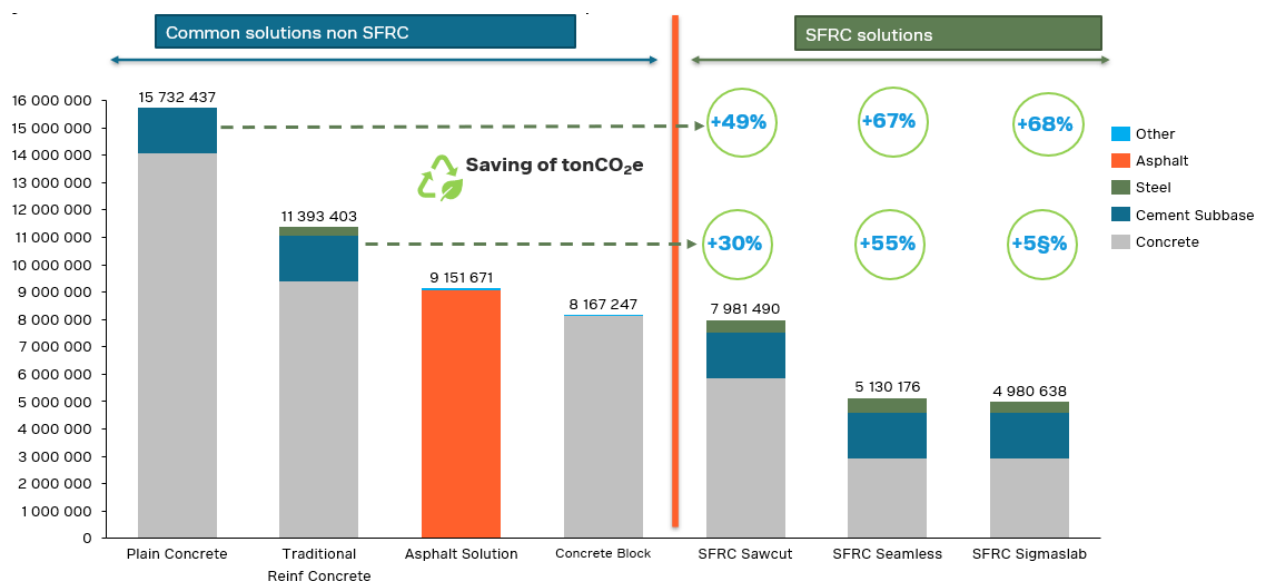


Figure 10 : Comparaison en termes d'émissions de CO2 prenant en compte la durée de vie des différentes solutions et opérations de réparation (OneClick LCA)

De plus, dans les systèmes combinés tels que la solution seamless ou Sigmaslab®, ces avantages sont encore plus grands puisque le nombre de joints est réduit, ce qui diminue encore plus la quantité de matériau utilisé et accélère la vitesse de construction grâce à l'omission des joints. Cette optimisation et la réduction de matière conduisent à terme à une réduction de l'impact environnemental et du coût de construction. Dans la Figure 10 il est possible d'apprécier une comparaison en termes d'émissions de CO2 des différentes solutions en prenant en compte la durée de vie utile de chaque système.

7. Cas d'étude, le dallage du port de Costanta en Roumanie

Les auteurs illustrent le projet du dallage portuaire du terminal sud de Costanta en Roumanie qui a été réalisé entre août 2022 et mars 2023.

Le dallage en objet était initialement prévu avec une solution en béton non renforcé ou béton armé de façon conventionnel, mais il a finalement été décidé d'adopter une solution avec des fibres métalliques.

Le choix a été principalement au manque de temps pour l'exécution par rapport au délai requis.

La solution adoptée avec des fibres Dramix 5D améliorées (double ancrage et plus grande résistance à la traction) a permis d'augmenter la durabilité et la qualité de la dalle mais aussi de réduire considérablement le temps d'exécution.

En effet le chantier a été achevé quatre mois avant la date demandée.



Figure 11 : Détails de l'exécution avec la machine à coffrage glissant

Les auteurs montrent la façon de travailler des fibres et les avantages réels de la solution comme le fait d'avoir pu réduire le renforcement nécessaire, ce qui présente un avantage en termes de transport, de stockage et de main-d'œuvre pour installer le renforcement.

Les auteurs montrent avec des images du chantier (Figure 11) les détails de l'exécution qui a été fait avec une machine à coffrage glissant et qui ont permis de dépasser les attentes des intervenants impliqués dans le projet.

8. Conclusions et recommandations

Les fibres d'acier Dramix sont utilisées dans le monde entier pour renforcer les dallages portuaires depuis 1985. Cela signifie 37 ans d'expérience dans ce secteur et la connaissance qu'un dallage renforcé avec des fibres d'acier Dramix dure plus longtemps et est plus performante que d'autres solutions. En particulier, dans les revêtements extérieurs, les fibres d'acier se sont révélées être le système de renforcement offrant les meilleures performances par rapport à :

- Capacité,
- durabilité,
- résistance à la fatigue,
- résistance aux chocs.

L'utilisation du béton renforcé avec des fibres d'acier, BRFA, s'est également révélée être la meilleure solution du point de vue de la durabilité par rapport à la solution avec de l'asphalte, du béton blanc, des armatures traditionnelles ou des blocs de béton, car elle implique une réduction des matériaux utilisés et augmente la durabilité des dallages, avec une réduction significative des émissions de CO2 et des coûts totaux (TCO).

Références

1. Di Mascio, P.; Loprencipe, G.; Moretti, L.(2019) “Technical and economic criteria to select pavement surfaces of port handling plants”, Rome, Département de génie civil, de construction et de l'environnement, Université Sapienza de Rome
2. Espagne ROM 4.1 (2018) “Recomendaciones para el proyecto y construcción de pavimentos portuarios”, Puerto del Estado, Ministerio de Fomento Madrid, 31 janvier 2018
3. Knapton, J. “Heavy duty pavements, The Structural Design of Heavy Duty Pavements for Ports and Other Industries, Edition 4” Ed.; British Port Association: Londres, UK, décembre 2008
4. Pianc Report 165 (2015) “Design and maintenance of container terminal pavements” The world association for waterborne transport infrastructure, Bruxelles, 2015



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)

Auteur principal : MERCIER Jérôme – jerome.mercier@arteliagroup.com – ARTELIA – Le First Part Dieu 2, avenue Lacassagne 69425 LYON CEDEX 03– France

Co-auteurs : CHOTARD David – david.chotard@arteliagrouavid.chotard.com – ARTELIA – Le First Part Dieu 2, avenue Lacassagne 69425 LYON CEDEX 03– France

Mots clés/Key words : Smart Grid, Production Energie Renouvelables, Mix Energétique Bas Carbone

Déploiement d'un Smart Grid Portuaire bas Carbone pour le Terminal de la pointe des Grives

Résumé de l'article :

Dans le cadre de sa stratégie de Développement Durable, le GPMLM porte des programmes d'actions en vue de réaliser la transition énergétique et améliorer la qualité de l'air sur le domaine portuaire. Le Terminal à conteneurs de la Pointe des Grives est un site stratégique qui traite 98% des marchandises entrant et sortant du territoire.

Le GPMLM souhaite concevoir, construire et exploiter, sur le site de la Pointe des Grives un système énergétique dont les objectifs sont :

- Permettre l'alimentation électrique à quai des navires (porte-conteneurs)
- Réduire les taux d'émissions de l'électricité délivrée aux navires en optimisant un mix énergétique constitué d'un ensemble d'installations photovoltaïques, d'un système de stockage et de l'électricité provenant du réseau EDF
- Optimiser l'autoconsommation de la production photovoltaïque lorsque les navires ne sont pas présents à quai et réduire le coût de l'électricité
- De garantir une réserve énergétique aux consommateurs stratégique

La mise en œuvre de ce SMART Grid implique une étude d'optimisation du système énergétique à déployer sur le port pour élaborer une offre de fourniture d'énergie aux navires à faible contenu carbone.

Cette optimisation a permis d'aboutir à une solution technique permettant de fournir une énergie aux navires avec un contenu carbone de 380 gCO₂/kWh, en moyenne annuelle, implique l'installation de 1,6 MW de photovoltaïque et 54 MWh de batterie. Une solution alternative s'appuyant sur un principe de garantie d'origine pour allouer aux navires la production photovoltaïque physiquement consommée par le port permet de fournir aux navires une électricité avec un contenu carbone équivalent de 268 gCO₂/kWh, en moyenne annuelle, pour 1,6 MW de photovoltaïque et 4,8 MWh de batterie. Cette alternative permet également de réduire le CAPEX de près d'un facteur 4.

Article :

1. Introduction et enjeux

L'objet du présent rapport est de présenter les résultats l'étude d'optimisation du Smart Grid de la Pointe des Grives, et en particulier des analyses suivantes :

- Optimisation du dimensionnement des différents composants du système Smartgrid
- Evaluation de la performance énergétique atteinte
- Evaluation des coûts complets de l'énergie
- Evaluation des niveaux de services rendus
- Identification des stratégies optimales de pilotage du système

2. Modélisation

Le terminal conteneur de la Point des Grives est actuellement alimenté en électricité par EDF SEI sur la base d'un mix énergétique encore fortement basé sur une production thermique. En outre, le secteur maritime est engagé dans une démarche de décarbonation, avec en particulier un enjeu fort concernant l'alimentation énergétique des navires aujourd'hui réalisés par des groupes thermiques à bord des navires. Le projet que souhaite mettre en place le GPMLM vise à proposer une offre de raccordement électrique à quai des navires tout en répondant aux enjeux suivants :

- Être en mesure de proposer une offre de fourniture d'électricité décarbonée aux navires ;
- Limiter l'impact de cette offre sur le réseau électrique Martiniquais ;
- Réduire les émissions carbone du Port ;
- Sécuriser l'alimentation en électricité du port pour l'amélioration de la qualité de service.

De plus, la conception globale du programme doit permettre d'atteindre le meilleur coût pour chacun des utilisateurs.

2.1 Principe de la modélisation

Dans ce contexte, les travaux objets du présent rapport ont pour objectif d'identifier les meilleures configurations des composantes du système pour différents niveaux de prise en compte des enjeux présentés au paragraphe précédent. Ils sont constitués de 3 volets : la construction de scénarios, l'analyse de sensibilité, et l'optimisation, comme illustrés sur le schéma suivant.

La méthodologie suit les quatre grandes étapes suivantes :

1. Identification des enjeux et sensibilités à étudier sur les niveaux de services à rendre et incertitudes du projet.
2. Elaboration d'une série de scénarios permettant d'évaluer les impacts de ces choix et incertitudes.
3. Elaboration d'un modèle du système énergétique du port
4. Etude des scénarios

Le périmètre d'étude étant le port et les navires à quai, le système électrique simulé dans le cadre de l'étude inclut le raccordement du réseau électrique, les productions photovoltaïques ainsi que le stockage. Le groupe d'électrogène est considéré comme un moyen de production en secours.

Chaque composant est caractérisé par ses spécifications techniques et la structure de ses coûts (CAPEX/OPEX). Les variables à optimiser sont bornées par les potentiels de déploiement, le cas échéant.

Pour une chronique horaire de demande annuelle donnée, l'algorithme simule le comportement de chaque composant du système en recherchant la solution minimisant le coût global tout en garantissant l'équilibre offre-demande ainsi que les contraintes techniques spécifiques à chaque composant.

Le modèle est composé de deux mailles, « Navires » et « Port », raccordées en elles.

Les demandes énergétiques des navires et du port sont respectivement associées aux mailles « Navire » et « Port ».

La maille « Port » dispose :

- D'un moyen de production « Réseau électrique » ayant des caractéristiques (Puissance, coût, contenu carbone) équivalentes à celles du raccordement électrique du port au réseau électrique Martiniquais,
- D'un potentiel d'installations photovoltaïques tel que caractérisé dans le WP2.1 EP 1,
- D'un potentiel de stockage batterie non contraint.

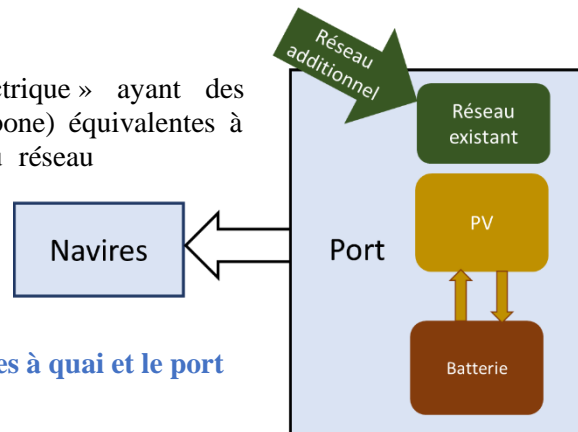


Figure 1 - Schéma de flux d'énergie entre les navires à quai et le port

3. Données d'entrées

3.1 La Demande

La reconstitution de la consommation électrique du port est effectuée sur la base des TOP10 de 2021. Le profil de la consommation électrique des navires est construit à partir des données de chargement/déchargement des conteneurs (Reefers et d'autres conteneurs) ainsi que de la consommation électrique de base pour les navires eux-mêmes. L'impact du passage d'un navire sur la demande portuaire est pris en compte dans la reconstitution par un recalage de la variation de la consommation du port par rapport au passage du navire : le jour de passage des navires est calé sur une plage de 1-2 jours autour des pics de consommation du port.

La reconstitution de la consommation sur l'année se traduit par les profils de demande électrique « Port » et « Navire » illustrés dans le graphique ci-après.

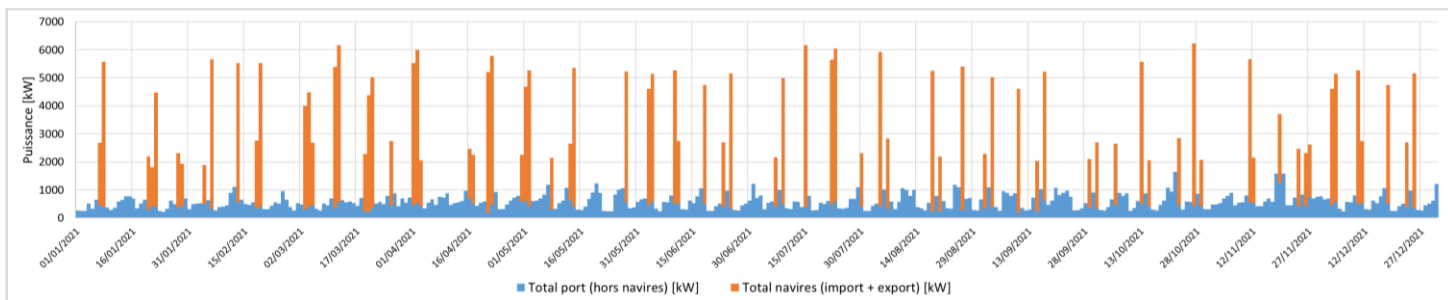


Figure 2 - Profil de consommation totale reconstituée (port et navires inclus)

3.2 Les Potentiels de production Photovoltaïque

Le cumul des puissances de l'ensemble des 10 sites représente un potentiel de 1614 kWc. Ces 10 sites sont mis en compétition entre eux par l'algorithme d'optimisation.



3.3 Contenu Carbone

Le calcul des émissions de CO₂ est obtenu par la somme de deux composantes :

- Emissions directes liées aux consommations d'énergie.
- Emissions indirectes liées aux puissances installées des différents composants.

Le facteur d'émission CO₂ équivalent du réseau électrique est considéré constant et indépendant des tranches horaires, égale à la valeur du contenu carbone moyen publié par l'ADEME : **753 gCO₂eq/kWh**. [Source : Bilan énergétique 2019 en Martinique par l'Observatoire Territorial de la Transition Ecologique et Energétique]

Selon l'ADEME, le contenu carbone pour la production photovoltaïque est de **43,9 gCO₂eq/kWh**. Pour convertir l'unité du facteur d'émission en tCO₂eq par puissance installée (MW installé), les calculs sont effectués comme suit :

$$Facteur_{\text{émissionCO}_2} \left[\frac{tCO_2eq}{MW_{\text{installée}}} \right] = \frac{Production \text{ annuelle } [MWh] * Coeff1 / Durée \text{ de } vie}{P_{\text{crête}} [kW] * 10^{-3}} * 43,9 \left[\frac{gCO_2eq}{kWh} \right] * 10^{-6}$$

Avec :

- *Coeff1* = 26,86 : Prise en compte de la baisse de production photovoltaïque sur sa durée de vie induite par la baisse de rendement du capteur : 3% la première année puis 5,5% les années suivantes.

Source : courbe de la garantie de performance linéaire construite par le fabricant (www.jinksolar.com).

- *Durée de vie* = 30 ans

Les émissions carbonées des batteries sont considérées proportionnelles à la capacité installée. Le facteur d'émission des batteries pris en compte est de 101 kgCO₂eq/kWh.

4. Etude de cas et analyse des résultats

Les scénarios sont construits de façon à être en mesure d'apporter des réponses aux trois questions ci-dessous :

1. Quelle est la stratégie visée par le dimensionnement ?

Cette stratégie dépend :

- Du **périmètre** des consommations d'énergie - navires et/ou port - devant être couvertes par le système énergétique ;
- De l'objectif visé entre une **minimisation du coût global** (optimisation économique) et une **minimisation de l'impact carbone**.

2. Quel est le niveau de service rendu ?

Cette problématique permet de tester l'impact de différents niveaux de **demande** énergétique : avec une approche sur **un semestre complet**, (scénario de référence) couvrant ainsi un large éventail de situations différentes, mais également sur des périodes de 2 semaines consécutives représentatives de différents niveaux de besoins induits par la nature de l'escale du navire et le nombre d'escale par semaine : une escale import ou export par semaine, et deux passages (import et export) de navires par semaine.

3. Quels sont les leviers sur lesquels nous volons jouer et quels sont les **variables à optimiser** entre le PV, le stockage et le raccordement électrique du réseau ?

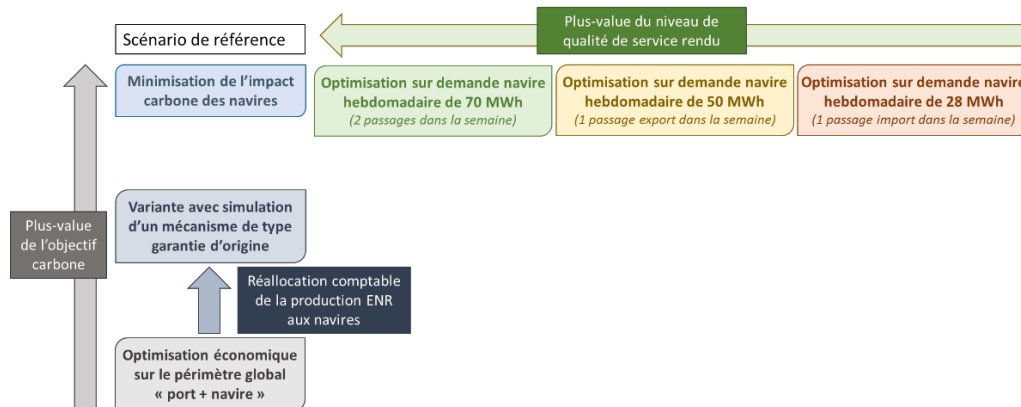
Cette question vise à comprendre les limites du dimensionnement optimum obtenu si certains leviers d'optimisation ne s'avèrent pas disponibles, comme la faisabilité d'une augmentation significative de la puissance souscrite, et ainsi mieux comprendre les contributions des différents éléments.

Il est à noter que tous les scénarios détaillés par la suite prennent en compte une subvention sur les coûts d'investissement (CAPEX) de la batterie et de PV dans la simulation.

4.1 Axes d'optimisation

Ces scénarios sont construits afin d'étudier l'impact sur le dimensionnement, la performance, et les coûts, de deux enjeux :

- Plus-value induite par l'exigence bas carbone ;
- Plus-value induite par la qualité de services rendus.
- L'organisation des scénarios est illustrée par le synoptique donné en figure suivante. Les scénarios sont également détaillés dans le tableau ci-après.



- Figure 3 – Synoptique des scénarios étudiés

4.2 Présentation des résultats des principaux scénarii

4.2.1 Scénario de Référence : Optimisation de l'impact carbone au périmètre navires sur un semestre

Le scénario de référence est construit de façon à répondre le plus fidèlement possible aux objectifs du GPMLM, à savoir : minimiser l'empreinte carbone de la fourniture d'énergie des navires. La recherche de la solution de moindre coût est effectuée sur un semestre.

Le graphique suivant illustre les flux d'énergie sur deux semaines et permet d'observer les conclusions suivantes :

- La batterie se charge autant que possible en présence de production photovoltaïque et en l'absence de navires à quai.
- Lors de la présence des navires, les navires consomment directement la production photovoltaïque et le complément d'énergie est apporté par la batterie jusqu'à son épuisement.
- Enfin le réseau électrique prend le relais.

Notons que cette stratégie priorisant la minimisation du contenu carbone peut être améliorée économiquement avec une très légère dégradation du bilan carbone en utilisant la batterie préférentiellement (1) en période d'heure de pointe ou pleine et (2) pour limiter l'augmentation de puissance souscrite du port.

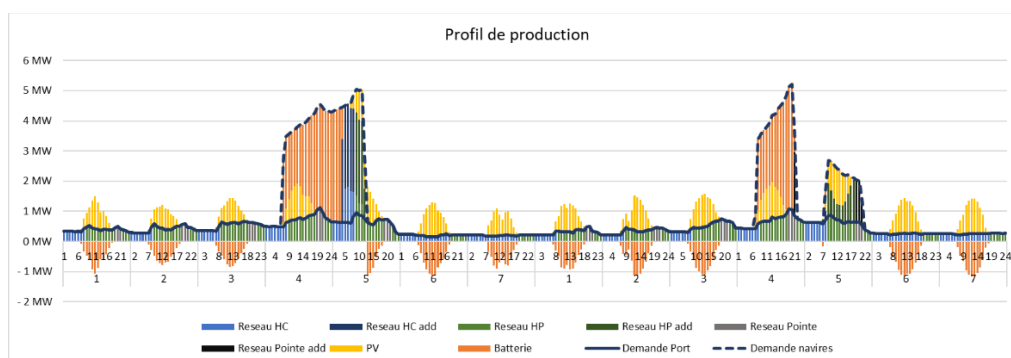


Figure 4 - Illustration de profil de production sur 2 semaines sélectionnées (Scénario de référence)

Les taux de pénétration d'énergie renouvelable sur l'année sont les suivants :

- Périmètre navire : 60%
- Périmètre global : 30%

Les contenus carbone moyen sur l'année sont les suivants :

- Périmètre navire : 380 gCO₂eq/kWh
- Périmètre global : 568 gCO₂eq/kWh

4.2.2 Scénario 1 : Optimisation économique sur un semestre, avec subvention

Ce scénario 1 vise à évaluer les conséquences de l'ambition environnementale du scénario précédent. Pour cela, le périmètre d'optimisation est élargi à l'échelle du port + navire, et la contrainte carbone supprimée ce qui revient donc à rechercher la solution de moindre coût économique sans ambition carbone.

Le graphique suivant illustre les flux d'énergie sur deux semaines et permet d'observer les conclusions suivantes :

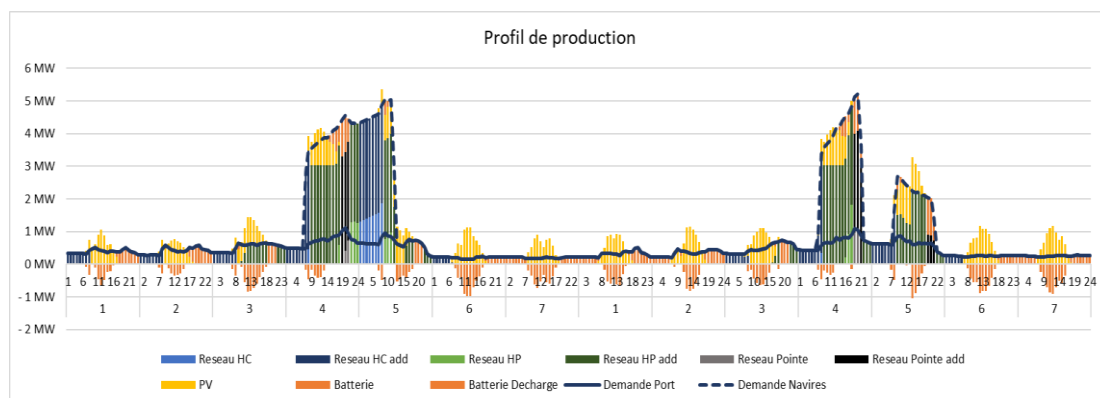


Figure 5 -

Illustration de profil de production sur 2 semaines sélectionnées (Scénario 1)

- Le port et les navires consomment directement la production photovoltaïque lorsque celle-ci est disponible.
- Seule la surproduction photovoltaïque est stockée dans les batteries.
- L'énergie photovoltaïque stockée dans les batteries est restituée au port et aux navires de façon à :
 - Réduire les achats d'électricité du réseau électrique martiniquais en période d'heure de pointe et d'heure pleine,
 - Limiter l'augmentation de puissance souscrite du port.

Les taux de pénétration d'énergie renouvelable sur l'année sont les suivants :

- Périmètre navire : 17%
- Périmètre global : 34%

En cohérence avec la nature de ce scénario, le taux d'ENR des navires est fortement réduit de 69% dans le scénario de référence contre 17% ici. En revanche, les taux d'ENR au périmètre global est légèrement augmenté. Cela s'explique par le moindre niveau de pertes d'énergie dans les batteries de ce scénario, la plus grande part de la production étant directement autoconsommée et non stockée dans les batteries.

Les contenus carbone moyen sur l'année sont les suivants :

- Périmètre navire : 659 gCO₂eq/kWh
- Périmètre global : 513 gCO₂eq/kWh

De façon similaire au taux d'ENR, bien que l'impact carbone pour les navires ait significativement augmenté, l'impact carbone global a légèrement baissé, bénéficiant, outre du gain sur les pertes du stockage, d'un moindre niveau de carbone gris par la réduction de la quantité de batterie à mettre en œuvre.

4.2.3 Scénario 1bis : variante avec garantie d'origine

Ce scénario 1bis vise à étudier une solution intermédiaire aux deux scénarios précédents en permettant une réallocation comptable, grâce à un mécanisme s'inspirant de celui de la garantie d'origine, de la production d'énergie renouvelable du port sur les navires. Dans ce contexte, la production d'énergie renouvelable n'est plus considérée comme consommée par le port, même si les flux physiques réels sont bien ceux observés dans le cadre du scénario 1, mais cédée aux navires.

Les dimensionnements des composants du système et les flux d'énergie sont identiques à ceux du scénario 1. Une comptabilité ad-hoc des volumes d'énergie renouvelable produits et consommés par le port est mise en place afin de vendre l'étiquette renouvelable de ces volumes aux navires.

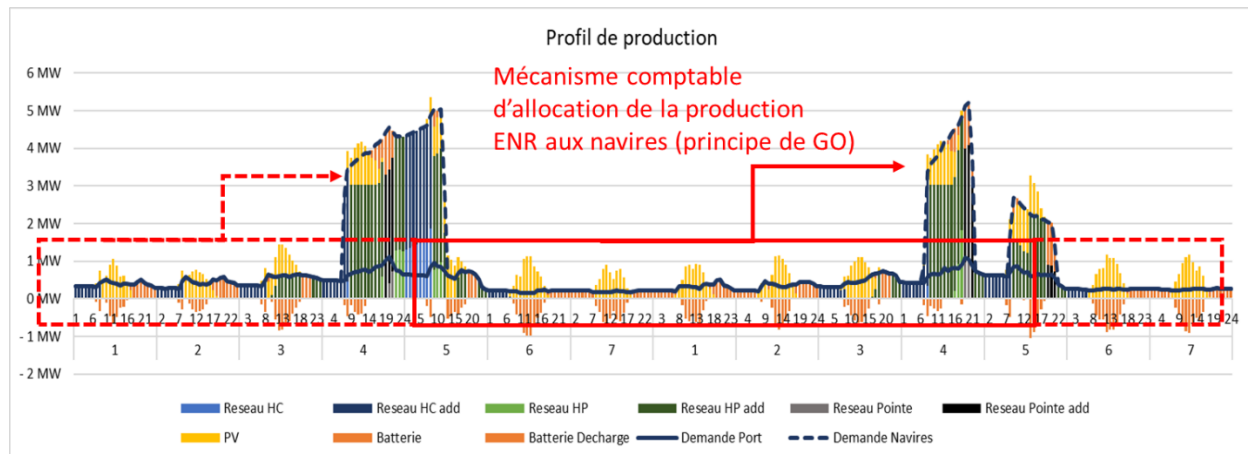


Figure 6 - Illustration de profil de production du scénario avec le mécanisme comptable d'allocation de la production EnR aux navires

Les taux de pénétration d'énergie renouvelable sur l'année sont les suivants :

- Périmètre navire : 69%
- Périmètre global : 34%

L'introduction de ce mécanisme inspiré par la garantie d'origine permet d'augmenter le taux de pénétration d'énergie renouvelable des navires à un niveau supérieur à celui du scénario de référence en bénéficiant de la réduction des pertes d'énergie dans les batteries (69% contre 60%). Cela est atteint pour un coût et un volume de stockage à déployer significativement plus réduit, divisé par un facteur 11.

Les contenus carbone moyen sur l'année sont les suivants :

- Périmètre navire : 268 gCO₂eq/kWh
- Périmètre global : 513 gCO₂eq/kWh

La même observation peut être obtenue sur le contenu carbone fourni aux navires.

5. Impact sur la Stratégie de pilotage de la batterie

Les résultats de différents scénarios présentés montrent que le pilotage de la batterie est un levier important dans l'optimisation de l'empreinte carbone ainsi que dans le bilan des coûts. Une série de prérequis est nécessaire pour assurer un bon pilotage de la batterie.

Il s'agit tout d'abord de disposer d'une prévision d'ensoleillement journalier à 5 jours afin d'être en mesure de prévoir la quantité d'énergie disponible lors du passage du prochain navire, et au pas de 10 minutes à 48 heures pour être en mesure d'optimiser le pilotage de la décharge des batteries.

En complément, Une prédiction de la demande des navires en approche doit pouvoir être obtenue par un automate à partir des données disponibles sur le navire en approche et son chargement :

- Heure d'arrivée des navires
- Nature du navire (longueur)
- Espérance de durée de présence à quai

- Nombre de conteneur dans les navires, la mobilisation des conteneurs lors du raccordement à quai, etc.

La gestion du stockage s'appuiera sur les principes suivants :

- En l'absence de navires à quai :
 - o La batterie non chargée sera chargée ;
 - o La batterie chargée servira pour répondre à la demande du port.
- Lors de l'annonce d'arrivée d'un navire :
 - o La demande du navire et la production photovoltaïque journalière seront prédites pour proposer une offre de raccordement au navire avec un taux d'ENR et contenu carbone, éventuellement assortie d'un plafond de volume d'énergie livrable.
- Lors du raccordement de navire à quai :
 - o Une prédiction des profils de puissances appelées du navire et de production photovoltaïque sur la période de présence à quai permettra un pilotage de la décharge de la batterie avec un quadruple objectif détaillé comme suit :
 - Maximiser le taux de pénétration ENR livré au navire.
 - Minimiser l'augmentation de puissance souscrite du port,
 - Minimiser le prix d'achat d'électricité avec un effacement sur les heures pleines et de pointe,
 - Maintenir une capacité de réserve primaire permettant d'assurer l'alimentation des besoins essentiels du port pendant 15 minutes.

6. Conclusion et perspectives/Conclusion and perspectives

L'étude d'optimisation du système énergétique à déployer sur le port pour élaborer une offre de fourniture d'énergie aux navires à faible contenu carbone apportent les conclusions suivantes :

- La solution technique permettant de fournir une énergie aux navires avec un contenu carbone de 380 gCO₂/kWh, en moyenne annuelle, implique l'installation de 1,6 MW de photovoltaïque et 54 MWh de batterie.
- Une solution alternative s'appuyant sur un principe de garantie d'origine pour allouer aux navires la production photovoltaïque physiquement consommée par le port permet de fournir aux navires une électricité avec un contenu carbone équivalent de 268 gCO₂/kWh, en moyenne annuelle, pour 1,6 MW de photovoltaïque et 4,8 MWh de batterie. Cette alternative permet également de réduire le CAPEX de près d'un facteur 4.

Concernant la puissance optimale photovoltaïque,

- Lorsqu'aucun navire est raccordé à quai, la puissance photovoltaïque optimale correspond à un niveau minimum de 1 349 kW, qui représente 83,5% du potentiel. Pour les autres situations, la puissance optimale est de 1 614 kW, représentant la totalité du potentiel PV.
- Malgré une puissance de pointe de 5,3 MW pour la typologie de navires retenus pour l'étude, le foisonnement des usages génère 4,2 MW de puissance appelée à la pointe.

Concernant l'impact du niveau de service visé sur le dimensionnement du système,

- Un dimensionnement restreint au tiers des semaines de plus faible demande des navires (1 passage import) permet une réduction de 300% de la capacité de batterie installée et de 60% des CAPEX pour un taux de pénétration d'énergie renouvelable au périmètre des navires de 100%.
- Un dimensionnement restreint aux 10% des semaines de plus forte demande des navires (un passage de navire pour l'export raccordé sur 2 jours) sur des semaines d'ensoleillement moyen induit une réduction de 10% de la capacité de batteries par rapport au scénario de référence. Dans le scénario de référence, les capacités de batterie additionnelles sont utilisées pour stocker la surproduction des semaines avec une demande faible telle qu'un passage de navire d'importation pour couvrir une partie de la demande sur les autres semaines. Ces batteries additionnelles cyclent donc sur plusieurs semaines.

Concernant les services qui peuvent être assurés par la batterie,

- Elle permet d'assurer une offre de fourniture d'électricité fortement renouvelable aux navires pour que le taux de pénétration des navires soit d'environ 60% en moyenne annuelle et puisse augmenter jusqu'à 100% selon la demande des navires et de l'ensoleillement.
- Le pilotage de la batterie permet d'éviter l'écrtage de la production photovoltaïque. Dans le scénario 1 (optimisation économique sur un semestre), la surproduction journalière PV atteint à 5,5 MWh tandis que le scénario sans passage des navires atteint à 3,7 MWh.
- Le couplage entre le PV et la batterie permet de limiter l'augmentation de la puissance souscrite à 4 MW en raccordant l'ensemble des navires.
- Le pilotage de la décharge de la batterie permet de réaliser une optimisation tarifaire de manière à augmenter le taux de couverture de la demande sur les heures de pointes et pleines, ce qui induit une réduction des achats d'électricité sur ces périodes.
- La batterie est capable d'assurer une réserve primaire permettant de couvrir la demande pendant le temps de démarrage des groupes électrogènes de secours. L'énergie correspondant à la puissance des usages nécessaires (1,8 MW dans le pire des cas) pendant 15 minutes est de 0,45 MWh, soit 0,8% de la capacité de la batterie du scénario de référence ; en coupant les reefers et en limitant l'utilisation des portiques, cette puissance peut être réduite à environ 600 kW (soit 0,15 MWh), soit 4% de la capacité de la batterie du scénario optimum économique (scénario 1). La batterie est donc en capacité d'assurer ce service.

Auteur principal :

Francescalberto De Bari - f.debari@portaltotirreno.it - Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale - Scali Rosciano, 6/7 57123 Livorno, Italy

Co-auteurs :

Francesco Papucci - f.papucci@portaltotirreno.it - Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale – Scali Rosciano, 6/7 57123 Livorno, Italy

Ivano Toni - i.toni@portaltotirreno.it - Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale – Scali Rosciano, 6/7 57123 Livorno, Italy

Manuela Scarsi - m.scarsi@portaltotirreno.it - Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale – Scali Rosciano, 6/7 57123 Livorno, Italy

Matteo Paroli - m.paroli@portaltotirreno.it - Autorità di Sistema Portuale del Mar Tirreno Settentrionale – Scali Rosciano, 6/7 57123 Livorno, Italy

Mots clés/Key words : Autonomous ship, economic impact, port management

Navigating the Future: Analysing the Effects of Autonomous Ships on Mediterranean Port Operations and Safety

Article's abstract:

Sea transport undergoes continuous changes following the introduction of new more or less disruptive information technologies, digitization and automation of the sector. Among these innovations, in particular, the transition to fully or partially autonomous ships represents both an opportunity and a challenge in terms of safety, security, sustainability, legislation and operations (11). The autonomous ship requires the updating of operators, as well as those involved in monitoring, managing, communicating and controlling vessel traffic.

On the EU side, studies are already underway since 2018 regarding the necessary adjustments to the current legislation (VTMIS directive) and, with the support of EMSA, ad hoc guidelines have been issued on the tests of autonomous surface maritime vessels, focusing at the technical, regulatory and standards level, to safeguard the protection of safety at sea and of the marine and coastal environment. Furthermore, it is clear that EU guidelines will need to be updated and improved and brought to the attention of the IMO and other appropriate stakeholder fora at the international level, as well as being brought down to the local/regional policy level.

In addition, the Union's Maritime Information and Exchange System and its further development for the safe management, monitoring, reporting and control of autonomous shipping will need to be supported, to jointly address challenges and achieve alignment of standards and common understanding for the testing and operation of self-contained seagoing surface vessels, including in ports.

As far as ports are concerned, especially in the scenario of autonomous ships wide spreading, significant efforts should be done for realizing assessment of the investments needed, cost/benefit analysis, assessment of the impacts on port management.

Article:

1. Introduction to autonomous ships and their potential impact on Mediterranean ports

The emergence of autonomous ships phenomenon has the potential to revolutionize sea transport and the global maritime industry, including the Mediterranean Sea. As the technology continues to advance, the implementation of these self-contained seagoing surface vessels will undoubtedly have significant effects on the way we navigate across the Mediterranean and manage our ports (7).

This article will survey the impact of autonomous ships on Mediterranean ports, touching on topics such as disruptive information technologies, digitization, automation, safety, security, sustainability, legislation, and investments, among others.

Autonomous ships rely on a combination of advanced sensors, artificial intelligence, and machine learning to navigate the seas without the need for a human crew on board. This has the potential to greatly improve efficiency in the shipping industry, as well as reduce environmental impact and the risk of human error. However, the widespread adoption of autonomous ships also presents a number of challenges, particularly in relation to port operations and safety. As such, it is crucial that both the maritime industry and port authorities carefully consider the implications of this new technology and adapt their strategies accordingly.

In the Mediterranean, where sea transport is a major contributor to regional economies, the integration of autonomous ships into existing port operations will require significant changes to infrastructure, management, and regulation, especially considering diversities and peculiarities of each country bordering the Med basin. As we delve deeper into the various aspects of this emerging technology, it becomes increasingly clear that the future of sea transport and port operations in the Mediterranean will be shaped by the successful integration of autonomous ships.

2. The role of disruptive information technologies and digitization in sea transport

Although the transport industry and the maritime sector are considered rather conservative as regards the introduction of technical innovations, various disruptive innovations already occurred, which have led to substantial changes in the industrial organization of shipping and in the way of satisfying the need for transport (12)(7).

Disruptive information technologies, such as artificial intelligence, machine learning, and the Internet of Things (IoT), have the potential to bring about significant changes in the maritime industry. The digitization of sea transport, in particular, is an essential factor in the development of autonomous ships.

Digitization enables the collection, storage, and analysis of vast amounts of data from various sources, such as sensors, satellite imagery, and weather forecasts. This data can then be used to optimize ship performance, improve route planning, and enhance decision-making processes. Furthermore, the ability to monitor and control various ship systems remotely enables the development of autonomous vessels that can operate without a human crew on board.

In the context of Mediterranean ports, the adoption of disruptive information technologies and digitization is essential for the successful integration of autonomous ships. This will require ports to invest in advanced communication systems, IoT devices, and data processing capabilities, as well as adapt their existing infrastructure to accommodate the unique requirements of autonomous vessels.

However, every innovation is examined thoroughly by the industry before being introduced and innovations call for a strong interconnection between the actors along the logistics supply chain, as sometimes the effects of introducing an innovation are maximum if all the actors adapt to it (11). Port Authorities can promote a favorable environment for the introduction and development of innovations - notably digital innovations - as well as balance the different interests at stake (6).

Also, the notion of development blocks suggests that interdependencies between the involved parties can affect a structural change process, meaning that complementarities may stimulate further innovations to solve imbalances, which may finally result in a balanced situation (2)(3). At the same time, this calls for a greater integration between stakeholders in the co-evolution of technologies and collaborative innovation or co-innovation (12).

3. Automation and safety: Analyzing the effects on vessel traffic control and safety at sea

One of the key benefits of autonomous ships is their potential to improve safety at sea by reducing the risk of human error, which is often cited as a leading cause of maritime accidents, accounting for 65% of the recorded accidents according to EMSA analysts (5). Automation can help to minimize the potential for mistakes in ship navigation and collision avoidance, as well as improve the efficiency of vessel traffic control systems. Furthermore, the implementation of autonomy on small cargo ships with a length below 120 mt is considered to have the largest safety benefit, when referring to fully autonomous ships as defined in the IMO's regulatory

scoping exercise on maritime autonomous surface ships (MASS). In fact these ships account for the majority of recorded ship losses and lives lost (4).

In the Mediterranean, where vessel traffic is dense and complex, the implementation of autonomous ships could greatly enhance safety, particularly in busy ports and congested shipping lanes. However, the integration of these vessels into existing vessel traffic control systems will require significant adjustments, including the development of new protocols for communication and coordination between autonomous ships and other vessels.

The automation aspects resulting from the implementation of connected ships also affect the logistics sector on the land side. The information on the maritime route of the ship (i.e. container ship) may enable a wide range of dockside services for unloading goods, thus reducing port transit time. Moreover, the integration of fully autonomous maritime traffic and fully automated terminal operations could lead to a leap in efficiency and safety in seaports (1)(8).

On the other side, the reliance on advanced sensors and communication systems raises concerns about the potential for cyber attacks or technical failures, which could jeopardize the safety of autonomous ships and other vessels in the vicinity. As such, it is crucial that maritime authorities and port operators adopt robust cybersecurity measures and ensure the reliability of the technologies underpinning autonomous vessel operations.

4. Security and sustainability: The potential benefits and challenges of autonomous ships

Beyond safety, autonomous ships also hold the potential to improve security and sustainability in the maritime industry. By reducing the need for large crews, these vessels can lower the risk of piracy and other security threats, as well as reduce the human trafficking and smuggling that sometimes occurs aboard cargo ships (13) (14).

In terms of sustainability, autonomous ships can optimize fuel consumption and reduce emissions by utilizing advanced navigation systems and route planning algorithms. This has the potential to significantly decrease the environmental impact of sea transport, particularly in the Mediterranean, where shipping is a major source of pollution and greenhouse gas emissions (10).

Knowing port traffic and weather conditions in real-time, through route and speed management systems not only in the sea areas surrounding the port, but also at longer distances, makes it possible to limit speed while reducing fuel consumption and thus pollutant emissions. This solution can be implemented through ship-side AI technologies, which also receive information from the port of destination (9). This therefore implies the need for integrated sensors and platforms between the various actors involved.

The reduction of pollutant emissions is also a consequence of the reduction of the ship's transit time, since, thanks to the knowledge of the ship's arrival and its unloading times, it is possible to reduce the waiting time of heavy vehicles in port.

The reduction of crew members generates a number of benefits for maritime transport services. Despite it is expected that in the coming years a shortage in crew recruiting will occur, autonomous navigation with reduced or null crew can counteract this predicted shortage. A second benefit is the strengthening of economic efficiency, especially for smaller ships, where the crew wages are an important part of the ship's expenses. Also, since unmanned ships no longer need accommodation and the associated ship systems, this simplifies the design, increases cargo carrying capacity and lowers building costs. Together, these aspects can lead to a significant cost reduction. In comparison with costs related to building traditional manned ships, if a positive difference is maintained between autonomous shipbuilding costs and efficiency gains from autonomous shipping, this innovation could lead to an upgrade in shipping operators competitive position (4).

However, the widespread adoption of autonomous ships also presents a number of challenges, such as the potential loss of jobs in the maritime industry and the need for significant investments in new technologies and infrastructure. Additionally, the transition to autonomous vessels raises questions about the potential for increased maritime traffic, which could have negative consequences for the marine and coastal environment.

5. Legislation and maritime guidelines: EU VTMIS directive, EMSA guidelines, and IMO guidelines

As the development and implementation of autonomous ships continue to progress, it is essential that international and regional legislation and guidelines keep pace with these technological advancements. In the European Union, the Vessel Traffic Monitoring and Information System (VTMIS) directive, issued by the European Maritime Safety Agency (EMSA), provides a framework for vessel traffic management and information sharing among EU member states.

The EMSA has also published guidelines for autonomous surface maritime vessels, which outline the various aspects of vessel design, operation, and risk management that should be considered by maritime authorities and industry stakeholders in the development of this new technology. Moreover, the International Maritime Organization (IMO) has established a regulatory framework for autonomous ships, which includes guidelines related to safety, security, and environmental protection.

In the Mediterranean, the adoption of these international and regional guidelines will be crucial for ensuring the safe and responsible integration of autonomous ships into existing maritime operations. This will require close collaboration between port authorities, shipowners, and other industry stakeholders, as well as the development of new legislation and regulation at the national level.

6. The EU Maritime Information and Exchange System: Aligning standards for autonomous surface maritime vessels

To facilitate a seamless integration of autonomous ships into Mediterranean ports, harmonization of standards and information sharing among participating countries is crucial. The European Union's Maritime Information and Exchange System (MIE) provides a platform for this, enabling the exchange of information related to vessel traffic, safety, and security among EU member states.

By adopting common standards for autonomous surface maritime vessels and ensuring the interoperability of communication systems and data formats, the MIE can help to create a harmonized framework for the operation of these vessels in the Mediterranean. This will be essential for the successful integration of autonomous ships into existing port operations and for enhancing safety and efficiency in the region's maritime industry.

7. Investments in autonomous ships and cost/benefit analysis

The development and implementation of autonomous ships require significant investments in research and development, new technologies, and infrastructure. For Mediterranean ports, this may involve the upgrading of some communication systems, either installing advanced sensors and IoT devices, or modifying existing infrastructure to accommodate the unique requirements of autonomous vessels.

In order to justify these investments, port authorities and industry stakeholders must carefully weigh the potential benefits, especially considering that, as the maritime industry continues to evolve, disruptive information technologies such as digitization and automation have been at the forefront of driving change.

with the development and implementation of autonomous ships. These costs include the need for extensive research and development, as well as the need to establish new infrastructure and regulatory frameworks to support their operation. In this context, it is essential for stakeholders to conduct a thorough cost/benefit analysis to determine the most appropriate strategies for the development and implementation of autonomous ships in the Mediterranean region.

8. Impacts on port management: Changes in operations and infrastructure

The advent of autonomous ships in the Mediterranean will have a profound impact on port management and operations. One of the most significant changes will be the need for ports to adapt their existing infrastructure and facilities to accommodate these new vessels. This may involve the construction of new berths, the modification of existing berths, and the installation of new navigational aids and communication systems.

The IMO's MSC (Maritime Safety Committee) Working Group outlined a step-by-step road map for the creation of an international code for the regulation of MASS. This road map envisages a first step by mid-2024 to issue a non-mandatory code, which will become mandatory from 1 January 2028.

In addition to these physical changes, there will be also a need for ports to adapt their operational procedures to accommodate the unique characteristics of autonomous ships. This may include the development of new protocols for vessel traffic control, the implementation of new safety and security measures, and the establishment of new procedures for the handling of cargo and other port services.

One of the key challenges in adapting port operations to accommodate autonomous ships is ensuring that the safety and security of both the vessel and the port are maintained at all times (13) (14). This will require close collaboration between port authorities, ship owners, and other stakeholders, as well as the development of new legislation and regulatory frameworks to govern the operation of autonomous ships in Mediterranean ports. In this regard, the EU VTMS directive, the EMSA guidelines for autonomous surface maritime vessels, and the IMO guidelines provide a solid foundation on which to build.

9. Preparing for the future: Strategies for adapting to autonomous ships in Mediterranean ports

In order to effectively adapt to the challenges posed by autonomous ships, Mediterranean ports must develop and implement a range of strategies that address both the short-term and long-term implications of this disruptive technology. One of the most important strategies is the alignment of standards and regulatory frameworks across the region. This will help to ensure that all ports are operating on a level playing field, and that there is a consistent approach to the management of autonomous ships throughout the Mediterranean.

Within the European framework, there is a need to make systems interoperable, leveraging standard for data formats, exchange and communication already defined both at international and European level. In particular, at Mediterranean level, seaports need a common minimum

set of data required for the management of the autonomous ships maneuvers, identifying the type of source and the characteristics of the data provided.

Another key strategy for Mediterranean ports is the development of new partnerships and collaborative initiatives with other ports, shipping companies, and technology providers. By working together, these stakeholders can pool their resources and expertise in order to develop innovative solutions to the challenges posed by autonomous ships, and to ensure that the benefits of this technology are realized as quickly and efficiently as possible.

In addition to these strategic initiatives, Mediterranean ports must also invest in the development and implementation of new technologies and systems that will enable them to effectively manage and operate autonomous ships. This may include the development of new vessel traffic control systems, the implementation of advanced communication and navigation technologies, and the integration of innovative safety and security measures.

10. Conclusion: Navigating the future of sea transport and port operations with autonomous ships

The rise of autonomous ships in the Mediterranean represents a significant shift in the maritime industry, with the potential to transform the way that ports operate and manage their operations. By embracing these new technologies, and by implementing the necessary changes to their infrastructure and operational procedures, Mediterranean ports can ensure that they are well-prepared to navigate the future of sea transport and port operations.

However, it is important that these changes are implemented in a coordinated and strategic manner, ensuring that the safety, security, and sustainability of both the vessels and the ports are maintained at all times. By working together, and by leveraging the expertise and resources of all stakeholders, Mediterranean ports can successfully adapt to the challenges posed by autonomous ships and continue to play a vital role in the region's economic growth and development.

As we enter this new era of sea transport, it is essential that all stakeholders – from port authorities to ship owners, technology providers, and regulators – collaborate and work together to ensure the successful integration of autonomous ships into Mediterranean port operations. By doing so, we can help to create a safer, more efficient, and more sustainable maritime industry that benefits everyone involved.

Bibliography:

1. Burmeister, H.C. - Bruhn, W. - Rødseth, Ø.J. - Porathe, T. (2014) Autonomous Unmanned Merchant

Vessel and its Contribution towards the e-Navigation. Implementation: The MUNIN Perspective, *International Journal of e-Navigation and Maritime Economy*, vol. 1, pp. 1-13, ISSN 2405-5352, <https://doi.org/10.1016/j.enavi.2014.12.002>.

2. Dahmén E (1950) Svensk industriell företagarverksamhet: kausalanalys av den industriella utvecklingen, vol 1. IUI, Stockholm, pp. 1919–1939
3. Dahmén E (1991) Development blocks in industrial economics. In: Carlsson B, Henriksson RGH0, Dahmén E (eds) Development blocks and industrial transformation : the Dahménian approach to economic development. Industrial Institute for Economic and Social Research (IUI), Stockholm, pp. 136–148
4. De Vos, J. – G. Hekkenberg, R. – A. Valdez Banda, O. (2021) The Impact of Autonomous Ships on Safety at Sea – A Statistical Analysis, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 210, 107558, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107558>.
5. EMSA (2019) Annual overview of marine casualties and incidents 2019.
6. Ferrari, C. – Ferrini, S. – Scarsi, M. (2021) L'innovazione in sistemi complessi e interdipendenti: il ruolo delle Autorità di Sistema Portuale, Dialoghi tra porto e città nell'epoca della globalizzazione. Per un approccio multidisciplinare alle sfide della portualità, vol. XII Collana Ricerca e Documentazione, Fondazione Aldo Della Rocca, a cura di Bonciani, Bordato, Giovene di Girasole, pp. 141-155.
7. Fonseca, T. - Lagdami, K. - Schröder-Hinrichs, J-U (2021) Assessing innovation in transport: An application of the Technology Adoption (TechAdo) model to Maritime Autonomous Surface Ships (MASS), *Transport Policy*, Volume 114, Pages 182-195, ISSN 0967-070X, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.09.005>.
8. Gu, Y. - W. Wallace, S. (2021) Operational benefits of autonomous vessels in logistics - A case of autonomous water-taxis in Bergen, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 154, 102456, ISSN 1366-5545, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102456>.
9. Im, I. - Shin, D. - Jeong, J. (2018) Components for Smart Autonomous Ship Architecture Based on Intelligent Information Technology. *Procedia Computer Science*. 134. 91-98. [10.1016/j.procs.2018.07.148](https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.148).
10. Raut, G.C. - Law, K.S. - Onishi, T. - Daskalakis, N. - Marelle, L. (2022) Impact of shipping emissions on air pollution and pollutant deposition over the Barents Sea, *Environmental Pollution*, vol. 298, 118832, ISSN 0269-7491, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.118832>.
11. Taalbi, J. (2017) Development blocks in innovation networks, *Journal of Evolutionary Economics*, Springer, vol. 27(3), pages 461-501, July. doi: 10.1007/s00191-017-0491-y.
12. Vanellander, T. - Sys, C. - Lam, J. - Ferrari, C. - Roumboutsos, A. - Acciaro, M. - Macário, R. - Giuliano, G. (2019) A serving innovation typology: mapping port-related innovations, *Transport Reviews*, 39(5), pp. 611-629, doi: 10.1080/01441647.2019.1587794.
13. Wróbel, K. - Montewka, J. - Kujala, P. (2017) Towards the assessment of potential impact of unmanned vessels on maritime transportation safety. *Reliability Engineering & System Safety*. 165. [10.1016/j.ress.2017.03.029](https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.029).
14. Wróbel, K. - Montewka, J. - Kujala, P. (2018) Towards the development of a system-theoretic model for safety assessment of autonomous merchant vessels, *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 178, pp. 209-224, ISSN 0951-8320, <https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.05.019>.

Auteur principal : Kovarik – Jean-Bernard – jean-bernard.kovarik@univ-eiffel.fr – Université Gustave Eiffel – 5 boulevard Descartes, Champs-sur-Marne, 77454 Marne-la-Vallée – France

Mots clés : Eurocodes, Actions, Houle, Courant, Sécurité

Caractériser les actions météo-océaniques sur des durées longues avec le format des Eurocodes

Résumé: Un travail normatif a été engagé il y a plusieurs années afin de compléter la série des “Eurocodes” par une nouvelle partie traitant des actions des courants et des vagues sur les structures côtières. La matière de cette communication est tirée de réflexions et travaux menés dans le cadre de la commission de normalisation CEN/TC 250/SC 1/WG 6. L’enjeu est de parvenir à caractériser les actions de la houle et des courants en appliquant les catégories du format de sécurité des Eurocodes, tel que décrit dans la norme NF EN 1990. Il s’agit d’appréhender les valeurs représentatives qui seront utilisées dans les calculs de vérification des états-limites des structures côtières : la valeur caractéristique, usuellement déterminée (pour une action climatique) par référence à une période de retour de plusieurs dizaines d’années (50 ans ou davantage) ; la valeur de calcul, usuellement déterminée par application à la valeur caractéristique d’un coefficient de sécurité partiel. Il faut également déterminer la valeur de combinaison, qui permet d’ajuster le niveau de sécurité général de la combinaison d’actions lorsque plusieurs actions s’exercent simultanément sur l’ouvrage. Cette classification des valeurs représentatives des actions est à la base des règles de calcul formalisées dans les Eurocodes. La difficulté vient de ce que l’analyse des actions météo-océaniques (houle, courant, vent, auxquels on ajoute les variations du niveau de l’eau au repos) doit se projeter sur toute la durée d’utilisation de l’ouvrage, et considérer l’existence de corrélations multiples entre paramètres, de plusieurs niveaux de variabilité court terme (état de mer), long terme (tempête) et très long terme (changement climatique). Le travail normatif va être soumis à l’enquête par le CEN en 2024. Il propose des valeurs : de la période de retour caractéristique selon la classe de conséquence de l’ouvrage et du coefficient partiel applicable à la charge hydrodynamique ; de prendre en compte les corrélations entre les paramètres par des périodes de retour jointes ou par des périodes de retour marginales de combinaison ; de substituer le coefficient partiel par une période de retour de calcul pour la vérification des ouvrages en enrochements ; le choix entre deux méthodes statistiques, au large ou à la côte ; d’appréhender l’impact du changement climatique de manière différenciée selon la possibilité ou non de renforcer ou d’adapter l’ouvrage avant la fin de sa durée d’utilisation.

Abstract : Several years ago, a standardization project was launched to complete the "Eurocodes" series with a new section dealing with the actions of currents and waves on coastal

structures. This paper is based on the work carried out by the CEN/TC 250/SC 1/WG 6 standardization committee. The challenge is to characterize the actions of waves and currents by applying the categories of the Eurocodes safety format, as described in NF EN 1990. In particular, we need to adapt the representative values that will be used in limit-state verification calculations for coastal structures: the characteristic value, usually determined (for a climatic action) by reference to a return period of several decades (50 years or more); the design value, usually determined by applying a partial safety coefficient to the characteristic value. It is also necessary to determine the combination value, which makes it possible to adjust the overall safety level of the action combination when several actions are simultaneously exerted on the structure. This classification of representative action values forms the basis of the design rules formalized in the Eurocodes. The difficulty lies in the fact that the analysis of meteo-oceanic actions (wave, current, wind, to which we add variations in water level) must be projected over the entire service life of the structure, and consider the existence of multiple correlations between parameters, with several levels of variability: short term variability (in a given sea state), long term variability (storms) and very long term (climate change). The normative work is under preparation, aiming at a CEN enquiry to be launched in 2024. It proposes values for the characteristic return period according to the consequence class of the structure, and for the partial safety factor applicable to the hydrodynamic load ; to take into account correlations between parameters by joint return periods or by marginal combination return periods ; to replace the partial safety factors by a design return period for the verification of armoured sloped breakwaters; to choose between two statistical methods (offshore or inshore) for the assessment of the hydrodynamic loads ; to consider the impact of climate change in a differentiated way depending on whether or not it is possible to reinforce or adapt the structure before the end of its service life.

Article :

1. Comment aborder les actions des courants et des vagues avec le format de sécurité des Eurocodes ?

Un travail normatif a été lancé par le CEN en 2018 afin d'introduire l'action des courants et des vagues dans la série des Eurocodes) en réutilisant les travaux synthétisés dans la norme ISO 21650 :2007. Le document prEN 1991-1-8 a été finalisé début 2023. Il sera soumis à l'enquête en 2024 auprès des organismes nationaux de normalisation.

La complexité de ce travail tenait en premier lieu à l'originalité du format des Eurocodes rendant nécessaire un large travail de relecture des pratiques existantes de l'ingénierie hydraulique (Guide Enrochements [ref. 1], EurOtop [ref. 2]).

Un enjeu tenait à la diversité des sources d'incertitudes obérant l'appréciation des actions de la houle: incertitudes sur les intensités et les occurrences des tempêtes (dites incertitudes de long terme), sur les hauteurs et périodes de vagues pendant une tempête (dites incertitudes de court terme), sur l'estimation

statistique des distributions des tempêtes à partir d'un échantillon de taille finie (dites incertitudes d'échantillonnage), dispersion des résultats des essais sur modèles réduits physiques d'où sont dérivées les formules de calcul utilisées pour les prédimensionnements, existence de corrélations entre les paramètres (hauteur de houle, période de houle, niveau d'eau, vitesse du vent), et naturellement le changement climatique et la non stationnarité des processus aléatoires qui en est la manifestation.

L'exécution du mandat de normalisation soulevait aussi la question des niveaux de sécurité cibles, car l'application des niveaux de sécurité de l'annexe C de la NF EN 1990 [ref. 3] ne faisait pas consensus, et du calage des valeurs représentatives qui s'ensuivait pour les actions.

La notion d'état-limite devait également être précisée. En effet l'ingénierie hydraulique formule habituellement ses critères de justification à l'aide de nombres adimensionnels (« nombres de stabilité »). Or ces nombres mettent ensemble des paramètres décrivant l'action de milieu marin et des paramètres propres aux éléments de protection. Aussi ni les charges ni les résistances ne sont apparemment définies. La condition d'état-limite canonique $Effet\ des\ actions \leq Résistance$ devait être modifiée en $Effet\ des\ actions \leq Valeur\ limite$ (Kovarik et al., 2023, ref. [4]).

Ces précisions permettent de dégager le format de vérification des ouvrages côtiers avec des conditions d'état-limite liées à des taux de dommage admissibles ou à des efforts admissibles :

- Les ELS correspondent à de sévères limitations des réponses (faibles déplacements, début de dommage) à vérifier sous des états de mer « caractéristiques » ;
- Les ELS correspondent à des réponses acceptables plus importantes (déplacements plus élevés, limite de ruine) sous des états de mer « de calcul », largement plus sécuritaires que les états de mer caractéristiques.

Cette communication vise à exposer la manière avec laquelle ce format est appliqué et comment sont caractérisés les paramètres météocéaniques (hauteurs et périodes de houle, vitesses des courants, niveaux d'eau variant avec la marée et les surcotes ou décotes...) qui servent à calculer les charges hydrodynamiques ou les réponses de l'ouvrage (efforts sur les digues verticales, franchissements, nombres de stabilité des blocs de protection...).

2. Prise en compte des dépendances entre les paramètres météocéaniques

La combinaison des hauteurs et périodes de vagues et des niveaux d'eau pour le calcul des ouvrages à la côte est une question complexe vu la dépendance de ces paramètres, plus ou moins élevée selon les sites. Une approche historique dominante est de choisir un paramètre météocéanique dominant au large, correspondant à une période de retour X et la combiner avec un autre paramètre météocéanique d'accompagnement au large, correspondant à une période de retour $X' < X$, dont la valeur est appréciée selon le degré de dépendance ou de corrélation entre les paramètres, et vice-versa. Puis l'on propage les deux états de mer à la côte et l'on calcule les réponses de l'ouvrage.

En se basant sur les travaux de (Mazas, 2017, ref. [5]) la commission de normalisation propose de prendre en compte les dépendances entre paramètres météocéaniques par l'utilisation de périodes de retour jointes.

Considérons deux variables aléatoires X et Y , corrélées, de fonctions de répartition marginales $F_X(x)$ et $F_Y(y)$, de fonction de répartition jointe $F_{XY}(x, y)$. Par exemple X et Y sont les maxima annuels de deux paramètres météocéaniques en un point donné (hauteur de houle et niveau d'eau). Pour simplifier la présentation on suppose dans la suite que les maxima annuels de X et Y peuvent se produire en même temps (le biais va dans le sens de la sécurité).

Les périodes de retour marginales RPm des valeurs x de la variable aléatoire X , et y de la variable aléatoire Y , sont :

$$RPm(x) = \frac{1}{Prob(X > x)} = \frac{1}{1 - F_X(x)} \quad (1)$$

$$RPm(y) = \frac{1}{Prob(Y > y)} = \frac{1}{1 - F_Y(y)} \quad (2)$$

On définit la période de retour conjointe RPj des deux valeurs x et y par :

$$RPj(x, y) = \frac{1}{Prob(X > x \text{ ET } Y > y)} = \frac{1}{1 + F_{XY}(x, y) - F_X(x) - F_Y(y)} \quad (3)$$

Pour le calage des périodes de retour (cf. section 3.2), la dépendance entre les variables aléatoires X et Y a été modélisée par une copule de Gumbel-Hougaard, de paramètre m :

$$F_{XY}(x, y) = \exp \left\{ - \left(\left(-\ln(F_X(x)) \right)^m + \left(-\ln(F_Y(y)) \right)^m \right)^{\frac{1}{m}} \right\} \quad (4)$$

Il s'ensuit la relation entre les périodes de retour marginales et jointes :

$$\frac{1}{RPj(x, y)} = \frac{1}{RPm(x)} + \frac{1}{RPm(y)} - 1 + \exp \left\{ - \left(\left(-\ln \left(1 - \frac{1}{RPm(x)} \right) \right)^m + \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{RPm(y)} \right) \right)^m \right)^{\frac{1}{m}} \right\} \quad (5)$$

Cette relation (5) a été utilisée pour caler des périodes de retour jointes cohérentes avec les périodes de retour marginales issues des niveaux de sécurité reconnus acceptables, pour différents cas de dépendance représentés par le paramètre m de Gumbel-Hougaard variant entre 1,05 (faible dépendance) et 1,20 (forte dépendance), à partir d'études de cas en Baie de Somme, sur le Pertuis charentais et la rade de Brest (*Background document*, 2023).

3. Calage des périodes de retour

3.1 Indices de fiabilité-cible

Les indices de fiabilité à prendre en compte dans le calage des périodes de retour des actions du milieu marin pour les ELS (période de retour caractéristique) et pour les ELU hydrauliques (périodes de retour de calcul) sont issus d'une revue de synthèse exploitant les éléments de PROVERBS [ref. 7], les travaux plus récents de l'AIPCN (2016) [ref. 8] sur les digues verticales et à talus et les valeurs de la NF EN 1990 Annexe C (Figures 1 et 2).

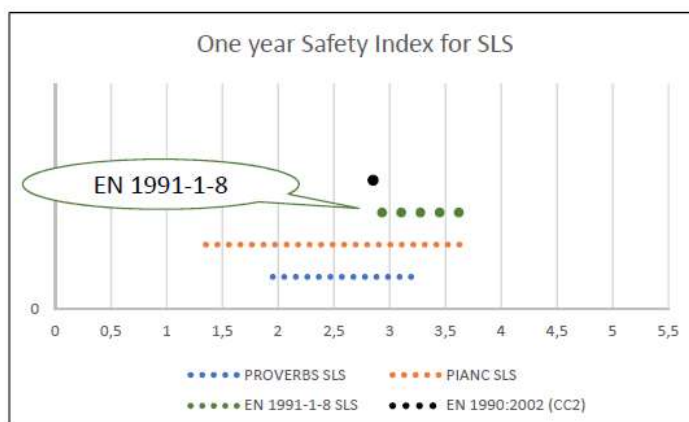


Figure 1 – Comparaison des indices de fiabilité des ELS sur 1 an selon différentes sources
(Background document de la prEN 1991-1-8)

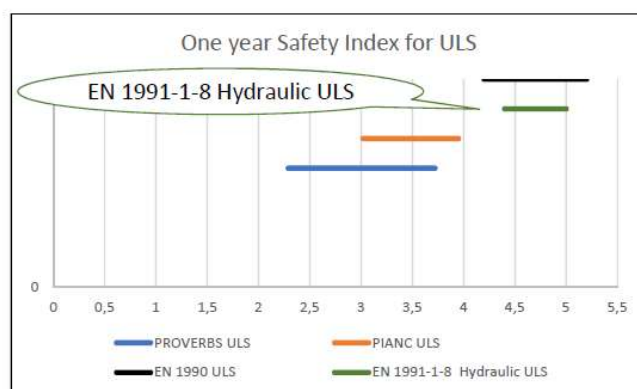


Figure 2 – Comparaison des indices de fiabilité des ELU sur 1 an selon différentes sources
(Background document de la prEN 1991-1-8)

Les choix de base sont de considérer la période de retour marginale caractéristique de 100 ans pour la classe de conséquence CC2, issue du consensus au sein de la commission, et l'indice de fiabilité sur 1 an de 4,7 pour la même classe de conséquence CC2, issue de la NF EN 1990 Annexe C. Les indices de fiabilité correspondants sont donnés dans le Tableau 1.

Classe de conséquences	ELS	ELU hydrauliques
CC3	3,68	5,0
CC2	3,32	4,7
CC1	2,93	4,4

Tableau 1 – Indices de fiabilité sur 1 an utilisés dans le calage des périodes de retour des charges hydrodynamiques (Background document de la prEN 1991-1-8)

Au contraire des ELS, les indices de fiabilité pour les ELU apparaissent au-delà des fourchettes issues de PROVERBS et de l'AIPCN. Il conviendra dans la suite d'étudier les « valeurs limites » apparaissant « à gauche » des conditions d'état-limite hydraulique et de les réviser en fonction du degré de sécurité qui apparaît « à droite » (ce travail ne relevait pas du mandat du CEN).

3.2 Facteur d'importance

La NF EN 1990 introduit un facteur de conséquence k_f pour moduler uniquement les coefficients partiels intervenant dans la formation de la valeur de calcul (et donc dans les ELU). Cependant il convient d'autoriser une différenciation des valeurs caractéristiques des actions du milieu marin selon la classe de conséquence des ouvrages, donc d'autoriser que les indices de fiabilité cibles des ELS soient différents selon la classe de conséquence. En s'inspirant d'un mécanisme de la NF EN 1998 sur le calcul sismique, on introduit pour les actions de la houle et du courant un « facteur d'importance » φ_I qui indique de combien il faut multiplier la période de retour (marginale ou jointe) caractéristique (paramètre dominant) de la CC2 pour passer aux autres classes de conséquences. Les périodes de retour sont multipliées par 2 pour la CC3, divisées par 2 pour la CC1.

3.3 Calage

Le point de départ du calage des valeurs caractéristiques a été établi par consensus au sein du groupe, éclairé par la revue ci-dessus, sur les périodes de retour caractéristiques pour les trois classes de conséquence. Avec un coefficient d'influence $\alpha_S = -0.7$ pour un paramètre dominant au sens de l'annexe C de l'EN1990, on en déduit les indices de fiabilité cibles pour les ELS. Le consensus sur la période de retour marginale de combinaison s'est porté sur la valeur de 10 ans pour la CC2 avec une dépendance moyenne ($m = 1,07$). Les autres valeurs s'en déduisent avec l'équation (5), ainsi que le coefficient d'influence α_S autour de -0.39 pour le paramètre d'accompagnement (Tableau 2).

Le point de départ du calage des valeurs de calcul est l'indice de fiabilité cible sur 1 an de 4,7 pour la CC2 indiqué dans l'EN1990. Avec le même coefficient d'influence $\alpha_S = -0.7$ pour un paramètre dominant on en déduit la période de retour marginale de calcul pour la CC2. En reprenant les valeurs des facteurs d'importance φ_I on détermine les périodes de retour marginales de calcul pour la CC1 et CC3. On en déduit les indices de fiabilité cibles pour ces classes de conséquence, qui se révèlent positionnées dans une fourchette plus resserrée que les valeurs de l'EN 1990. Le coefficient d'influence α_S de -0.39 pour le paramètre d'accompagnement permet de calculer les périodes de retour de combinaison, puis les périodes de retour jointes de calcul (Tableau 3).

Classe de conséquences	Période de retour marginale caractéristique pour le paramètre dominant (années)	Période de retour marginale de combinaison pour le paramètre d'accompagnement (années), selon le degré de dépendance	Période de retour jointe (années)
CC3	200	6 à 140	700
CC2	100	5 à 70	350
CC1	50	4 à 40	175

Tableau 2 – Périodes de retour pour la valeur caractéristique de la charge hydrodynamique (prEN 1991-1-8)

Classe de conséquences	Période de retour marginale caractéristique pour le paramètre dominant (années)	Période de retour marginale de combinaison pour le paramètre d'accompagnement (années), selon le degré de dépendance	Période de retour jointe (années)
CC3	4000	6 à 1 800	12 000
CC2	2000	6 à 900	6 000
CC1	1000	5 à 450	3 000

Tableau 3 – Périodes de retour pour la valeur de calcul de la charge hydrodynamique, pour application aux états-limites hydrauliques (prEN 1991-1-8)

3.4 Coefficients de sécurité partiels

Les périodes de retour de calcul ci-dessus ne sont utilisées que pour les états-limites hydrauliques. Pour la vérification des états-limites structuraux et géotechniques (défaut de capacité portante, glissement sur la base, défaut de résistance des structures béton...), les conditions d'état-limite prennent la forme *Action < Résistance* et l'on sait appliquer des coefficients partiels.

Pour les actions variables, les Eurocodes préconisent un coefficient partiel $\gamma_Q = 1,50$ appliqué à une valeur caractéristique cinquantennale.

Selon les règles de la construction *offshore*, un coefficient partiel de 1,30 est appliqué dans les conditions marines centennales.

Le souhait de la commission de normalisation de rester dans une certaine cohérence avec l'*offshore* a débouché vers le compromis d'un coefficient de 1,35 appliqué aux conditions marines caractéristiques (période de retour était de 100 ans en CC2).

4. Traitement statistique de données au large et à la côte ?

Deux méthodes sont identifiées.

Méthode des valeurs extrêmes au large. Un petit nombre d'ensembles de paramètres métocéaniques au large (houle, niveau d'eau) est sélectionné par le biais d'une analyse statistique marginale ou conjointe. Un jeu de paramètres au large est formé de la valeur caractéristique du paramètre métocéanique dominant et de la valeur de combinaison des paramètres d'accompagnement. Plusieurs jeux (ou combinaisons) au large sont constitués, correspondant à différents choix du paramètre métocéanique dominant. Tous ces jeux ou combinaisons sont transférés à la côte à l'aide d'un modèle numérique. La charge hydrodynamique est la réponse la plus défavorable de la structure.

Méthode du transfert complet à la côte. Un grand nombre d'événements métocéaniques, observés ou simulés, sont transférés à la côte à l'aide d'un modèle numérique. Les valeurs représentatives de la charge hydrodynamique sont choisies après une analyse statistique des valeurs extrêmes de la distribution des réponses de la structure. Dans cette méthode, il n'est plus nécessaire de faire au préalable des combinaisons de paramètres métocéaniques.

5. Prise en compte du changement climatique

Le changement climatique cause une évolution du climat maritime beaucoup plus significative pour les dimensionnements des ouvrages que la mise au point fine des périodes de retour cibles.

A ce stade et dans l'attente de travaux plus en profondeur sur la prise en compte des non stationnarités dans la définition des périodes de retour et des indices de fiabilité :

- Pour les ouvrages adaptables ou remplaçables, on considère les conditions régnant au moment de la première opération de maintenance ou à défaut au 2/3 de la durée de vie de l'ouvrage ;
- Pour les ouvrages ni adaptables ni remplaçables, on considère les conditions régnant en fin de vie (en supposant bien entendu que les conditions les plus sévères sont celles à venir).

Ces règles devront être précisées par des travaux ultérieurs.

6. Conclusion

La prise en compte des actions hydrauliques dans les Eurocodes opère un renversement de point de vue qui ne laissera pas la communauté professionnelle indifférente. Par-delà les différences de vocabulaire, les études test à poursuivre montreront (notamment en vue de l'enquête du CEN sur la prEN 1991-1-8 qui est attendue en 2024) si l'objectif général de limitation des impacts sur l'économie des travaux maritimes et côtiers est atteint ou non, et s'il y a lieu ou non d'engager des travaux normatifs complémentaires sur les critères de stabilité des matériaux et structures à la mer.

Références

- [1] CETMEF, CIRIA, CUR (2009) *Guide Enrochements, L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques*, version française du Rock Manual, Ed. Cetmef, Compiègne
- [2] EurOtop (2018) *Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application*. Van der Meer J.W., Allsop N.W.H., Bruce T., De Rouck J., Kortenhaus A., Pullen T., Schüttrumpf H., Troch P. and Zanuttigh B., www.overtopping-manual.com
- [3] (2003) NF EN 1990 Eurocodes structuraux, bases du calcul des structures
- [4] Kovarik, J.B., Ropert, F., Hafid, A. (2023) *Addressing Hydraulic Limit States of Coastal Structures within Eurocode safety format*, ICE Coasts, Marine Structures and Breakwaters conference, 2023.
- [5] Mazas, F. (2017) *Événements météocéaniques extrêmes*, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, Marne-la-Vallée, France
- [6] (2023) *Revised background to EN 1991-1-8 Safety Levels*, CNE/TC 250/SC 1/WG 6 N 241 (en cours de publication)
- [7] (1999) *PROVERBS : Probabilistic Design Tools for Vertical Breakwaters*. MAS3 – CT95 – 0041, edited by H. Oumeraci, N.W.H. Allsop, M.B. de Groot, R.S. Crouch, J.K. Vrijling
- [8] PIANC (2016) *Criteria for the selection of breakwater types and their related optimum safety levels*. MarCom report 196, Ed. PIANC, Brussels, Belgium

Auteur principal : Mazas Franck – franck.mazas@arteliagroup.com – ARTELIA – 6 rue de Lorraine, 38130 Échirolles, France

Mots clés/Key words : analyse conjointe houle-niveau, valeurs extrêmes, eustatisme, probabilité de rencontre

Prise en compte de la remontée eustatique du niveau moyen dans les analyses conjointes houle-niveau pour le dimensionnement des ouvrages portuaires

Résumé de l'article: Les analyses probabilistes conjointes houle-niveau permettent de préciser les probabilités d'occurrence des actions hydrauliques les ouvrages de protection (franchissement, stabilité de la carapace, efforts...), et ce en prenant en compte la dépendance entre les deux phénomènes. Il en résulte des contours de probabilité de dépassement conjointe de la hauteur significative des états de mer et du niveau marin, le long duquel des couples seront sélectionnés pour le dimensionnement en fonction de la réponse de l'ouvrage à considérer.

Cependant, l'élévation du niveau marin sous l'effet du changement climatique modifie les probabilités bivariées : chaque année, la probabilité de dépassement d'un couple hauteur / niveau augmente, et sa période de retour conjointe diminue. Une approche simplifiée et conservative pour prendre en compte cette remontée eustatique consiste à ajouter au couple considéré l'élévation attendue à la fin de la durée de vie du projet, ce qui donnera par exemple un couple de période de retour conjointe centennale lors de la dernière année de la période considérée. À l'inverse, la période de retour correspondante en début de durée de vie du projet peut être très supérieure à celle souhaitée.

Il est ici proposé d'aborder cette problématique par le truchement de la probabilité de rencontre sur toute la durée de vie du projet. En la réécrivant de façon à considérer une distribution bivariée évoluant chaque année en fonction de l'élévation attendue, il devient alors possible de déterminer la surélévation de niveau à prendre en compte par rapport à l'état actuel (hors eustatisme) de façon à obtenir, sur toute la durée de vie du projet, une probabilité de rencontre de l'évènement de période de retour fixée équivalent à celle du cadre stationnaire.

Cette approche permet ainsi d'optimiser l'adaptation du dimensionnement des ouvrages portuaires vis-à-vis de l'élévation attendue du niveau de la mer.

Article's abstract : Joint probability analyses of waves and sea levels can be used to estimate the occurrence of the hydraulic loads harbour structure (overtopping, stability of the armour of a rubblemound breakwater, loads on a caisson...), taking into account the dependence between the two phenomena. As a result, contour lines of joint exceedance return period of significant

wave height and sea level may be drawn, along which pairs may be selected for the design, depending on the response of the structure to consider.

However, the eustatic rise of sea level due to climate change modifies the bivariate probabilities: every year, the probability of exceedance of a given pair wave height / sea level increases, while its joint return period decreases. A simplified and conservative approach consists in adding to the considered pair the rise expected at the end of the project lifetime: at that time, the joint return period will be that to use for the design. Conversely, at the beginning of the lifetime, it will be much higher.

It is proposed to handle this issue through the encounter probability over the whole project lifetime. Making it dependent on a joint probability that varies every year with the expected rise makes it possible to determine the rise from the baseline situation (without eustatism) to consider in order to obtain an encounter probability of the design event that is identical to that of the stationary case.

This approach optimizes the adaptation of the design of harbour structures to cope with the expected rise of sea level in the next decades.

Article :

1. Introduction et enjeux

Les infrastructures de protection portuaires (digues à talus, digues verticales, quais...) sont dimensionnées en prenant en compte l'action conjointe des phénomènes météo-océaniques, au premier rang desquels les états de mer et le niveau marin. Les actions hydrauliques qu'ils exercent sur un ouvrage induisent diverses réponses de la part de celui-ci, qu'il s'agisse de son franchissement, des efforts exercés sur les caissons ou le mur de couronnement, de la stabilité de la carapace ou de celle de la butée.

Les analyses probabilistes conjointes houle-niveau permettent de préciser les probabilités d'occurrences de ces actions, et ce en prenant en compte la dépendance entre les deux phénomènes (Mazas et Hamm, 2017 [1], Mazas, 2019 [2]). Ces analyses consistent à :

1. établir l'échantillon des événements bivariés à partir de la série temporelle conjointe houle / niveau ;
2. déterminer les valeurs extrêmes de chacun des deux paramètres pris séparément (distributions marginales) ;
3. caractériser la dépendance entre les deux variables par un modèle de dépendance bivarié tel qu'une copule des valeurs extrêmes ;
4. combiner les distributions marginales et le modèle de dépendance dans une distribution bivariée houle-niveau caractérisée par ses fonctions de densité de probabilité et de répartition.

De cette distribution bivariée, il est possible de tracer des contours de probabilité de dépassement conjointe de la hauteur significative des états de mer H_s et du niveau marin Z . Le long de ce profil, chaque couple hauteur de vagues / niveau marin aura la même probabilité de dépassement conjoint (voir par exemple Serinaldi, 2015 [3] pour la signification des périodes de retour bivariées), mais en revanche pourra provoquer des réponses différentes : ainsi le couple maximisant le franchissement d'un ouvrage de protection de front de mer différera-t-il du couple le plus pénalisant pour la stabilité de son éventuelle butée (Hawkes et al., 2002 [4]). Ainsi, plusieurs couples bien choisis doivent-il être pris en compte pour le dimensionnement de l'ouvrage (*Figure 1*).

Par ailleurs, le dimensionnement doit se faire sur la base d'une ou plusieurs périodes de retour T_r (autrement dit, des probabilités annuelles de dépassement) dont la valeur doit (ou devrait) dépendre des enjeux liés à l'ouvrage ainsi que de la durée de vie D de celui-ci.

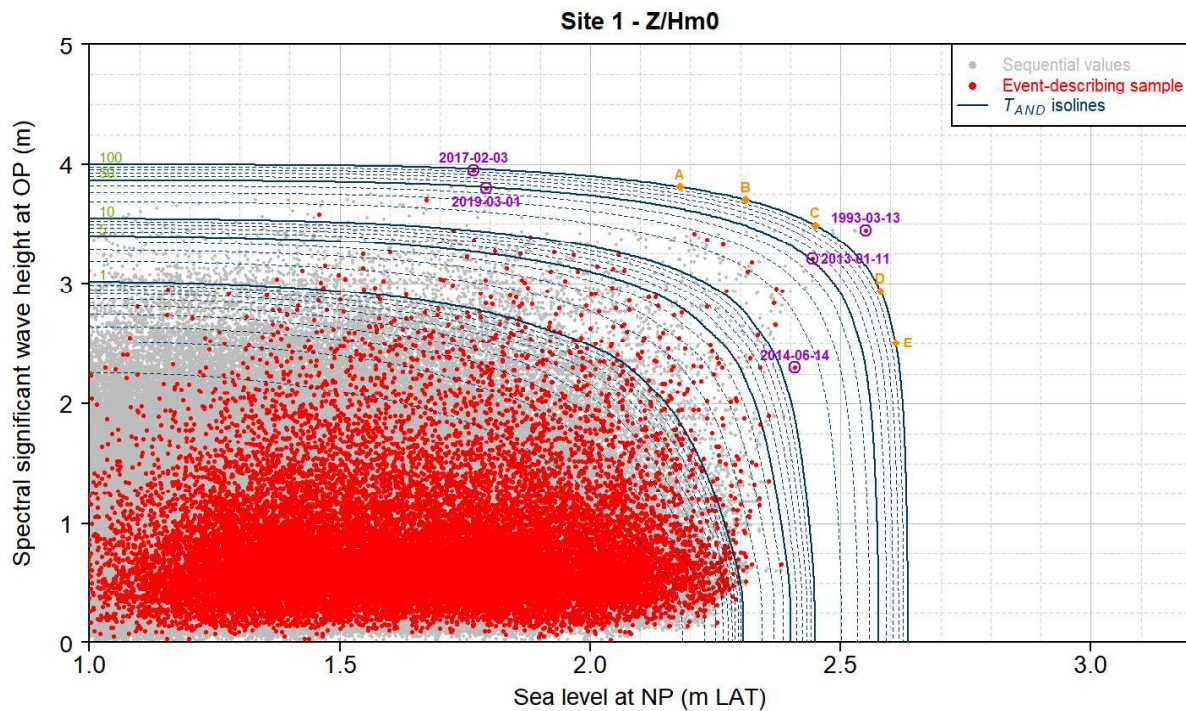


Figure 1 : Exemple d'utilisation de probabilités combinées houle-niveau. Points gris : valeurs horaires H_s/Z de la série temporelle conjointe. Points rouges : échantillon des événements extraits de la série temporelle conjointe. Points rouges cerclés de violet : sélection de quelques tempêtes historiques remarquables. Lignes bleues : contour d'iso-périodes de retour de dépassement conjoint. Losange orange : couples retenus pour les calculs de dimensionnement.

Cependant, l'élévation eustatique du niveau marin sous l'effet du changement climatique modifie les distributions bivariées ainsi obtenues. Chaque année, la probabilité de dépassement d'un niveau donné, et *a fortiori* d'un couple donné hauteur / niveau augmente, et sa période de retour conjointe diminue. Une approche simplifiée et conservative pour prendre en compte cette remontée eustatique

consiste à décaler les contours de l'élévation attendue δZ_D à la fin de la durée de vie du projet, comme illustré *Figure 2*.

Si l'on s'intéresse à l'évènement E situé sur le contour de période de retour de dépassement conjoint de 100 ans en *Figure 1*, le couple H_s^E/Z^E a une période de retour de 100 ans en début de vie de l'ouvrage mais de l'ordre de 3 ans en fin de vie. À l'inverse, le couple $H_s^E/Z^E + \delta Z_D$ a une période de retour de 100 ans en fin de vie, mais bien plus élevée en début de vie, de l'ordre de 10 000 ans.

On peut ainsi considérer que le dimensionnement de l'ouvrage est conservatif sur l'ensemble de sa durée de vie D , comparé au cas fictif d'une vie de l'ouvrage sans remontée eustatique, que l'on nommera cas stationnaire. Il y a donc un réel enjeu à préciser la meilleure façon de prendre en compte la remontée eustatique du niveau moyen dans le dimensionnement des ouvrages portuaires.

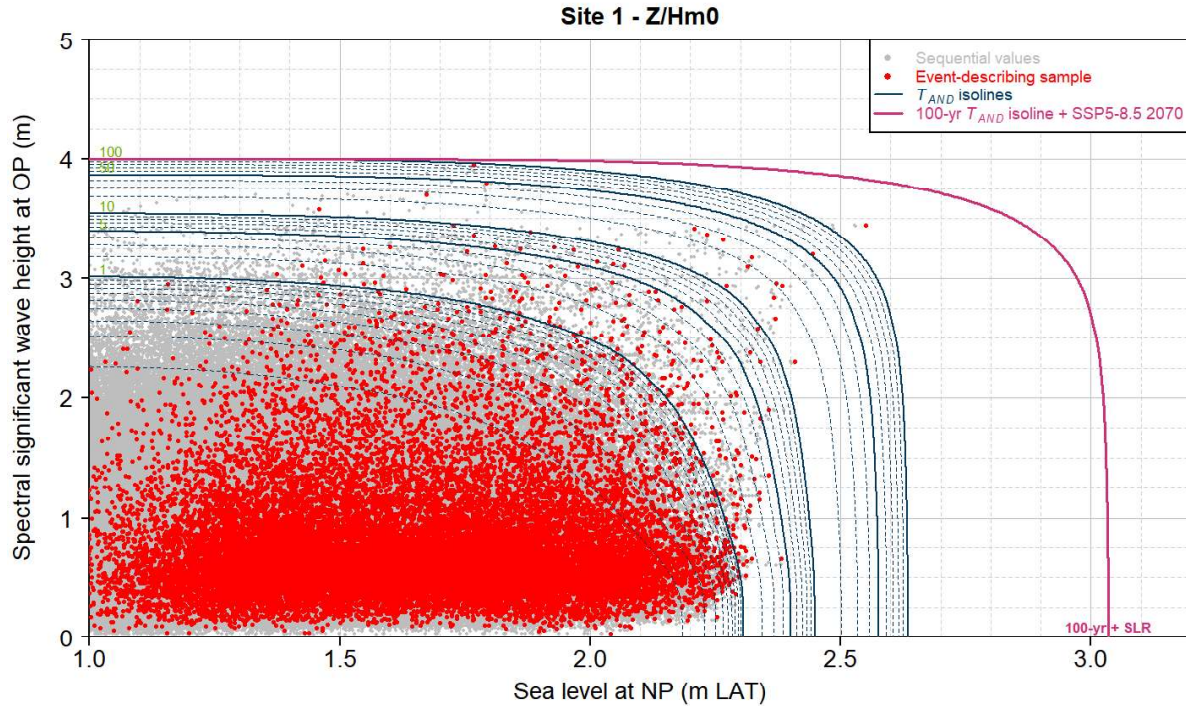


Figure 2 : Exemple de prise en compte simplifiée de la remontée eustatique du niveau moyen dans une analyse combinée houle / niveau (cas du contour de période de retour conjointe 100 ans).

2. Approche retenue

2.1 Probabilité de rencontre

Il est ici proposé d'aborder cette problématique par le truchement de la probabilité de rencontre \mathbb{P}_E sur toute la durée de vie du projet. Celle-ci représente la probabilité de rencontrer au moins une fois lors de la durée de vie D de l'ouvrage l'évènement dimensionnant de période de retour T_r et vaut dans le cas stationnaire (λ étant le nombre moyen d'évènements par an) :

$$\text{Équation 1 - } \mathbb{P}_E = 1 - \left(1 - \frac{1}{T_r}\right)^D = 1 - (1 - \lambda \mathbb{P}[X > x, Z > z])^D$$

Cependant, dans le cas instationnaire, la probabilité annuelle de dépassement $\mathbb{p} = 1/T_r$ varie chaque année de la durée de vie :

$$\text{Équation 2 - } \mathbb{P}_E = 1 - (\mathbb{p}_1 \times \mathbb{p}_2 \times \dots \times \mathbb{p}_D)$$

Si l'évolution de la valeur de \mathbb{p}_i peut être connue chaque année en fonction de l'élévation attendue, il devient alors possible de déterminer la surélévation de niveau à prendre en compte par rapport à l'état actuel de façon à obtenir, sur toute la durée de vie du projet, une probabilité de rencontre de l'évènement de période de retour fixée équivalent à celle du cas stationnaire.

Ainsi, pour un dimensionnement basé sur une période de retour T_r de 100 ans et une durée de vie D de 50 ans, la probabilité de rencontre dans le cas stationnaire est de 0,39 (Équation 1). Il s'agit donc de trouver la valeur de δZ_D aboutissant à $\mathbb{P}_E = 0,39$ en application de l'Équation 2 relative au cas instationnaire.

2.2 Remontée eustatique attendue dans la durée de vie du projet

L'évolution du niveau moyen de la mer au cours de la vie de l'ouvrage peut être estimée à partir des projections régionalisées basées sur les scénarios climatiques du GIEC. Il faut donc au préalable choisir un scénario climatique, qui dépendra du contexte du projet. On peut illustrer cette méthodologie par le scénario médian SSP5-8.5, qui prévoit une remontée de 0,40 m sur le site étudié au bout de 50 ans (2070).

Les valeurs de remontée sont en général fournies tous les 10 ans, qu'il faut interpoler tous les ans de la durée de vie du projet. Sur la *Figure 3* ci-après, on fait le choix d'une loi parabolique, qui correspond bien aux observations passées et aux projections à court terme ; cependant un autre type de loi pourrait être retenu pour des scénarios plus optimistes, qui adoptent une pente plus linéaire sur le long terme.

Cette interpolation permet donc d'obtenir la remontée δZ_i pour chaque année i entre 0 et D .

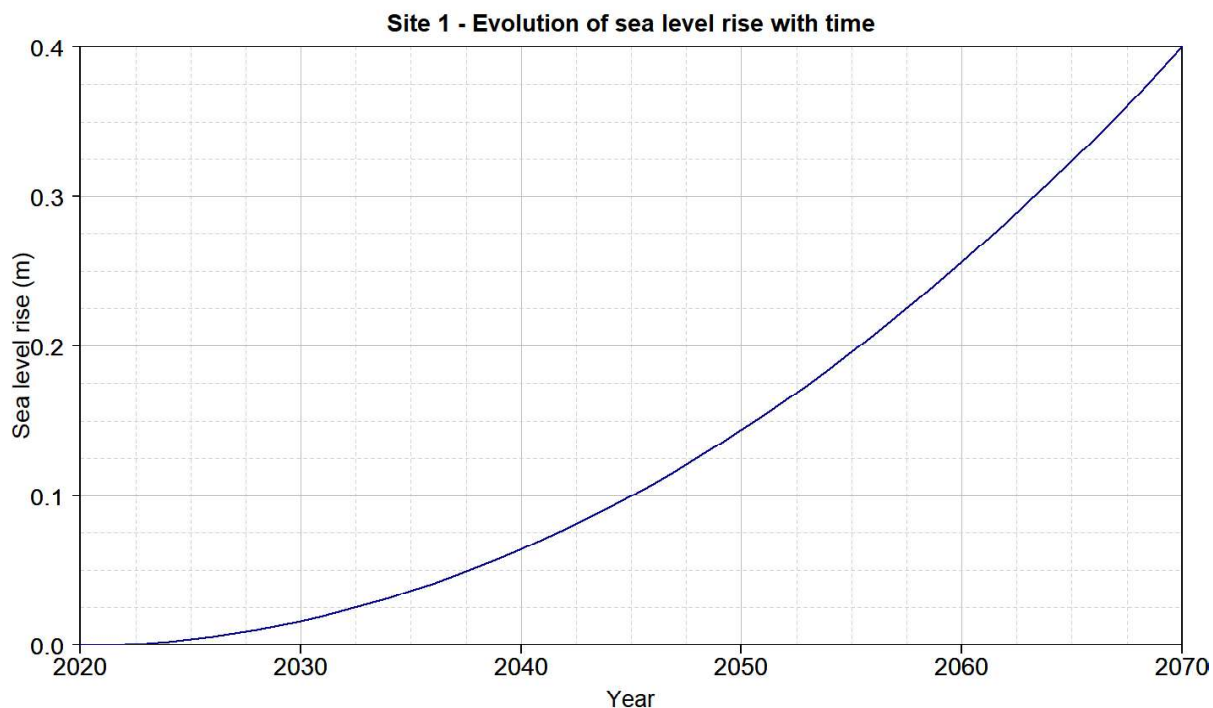


Figure 3 : Détermination de la remontée attendue pour chaque année sur la durée de vie du projet par une loi parabolique

2.3 Détermination de la remontée à prendre en compte

Dans un premier temps, pour chaque année i , la distribution bivariable $\mathbb{P}[X > x, Z > z]$ estimée dans l'état actuel est décalée en niveau d'une valeur de δZ_i , comme illustré pour la fonction de densité bivariable ci-après.

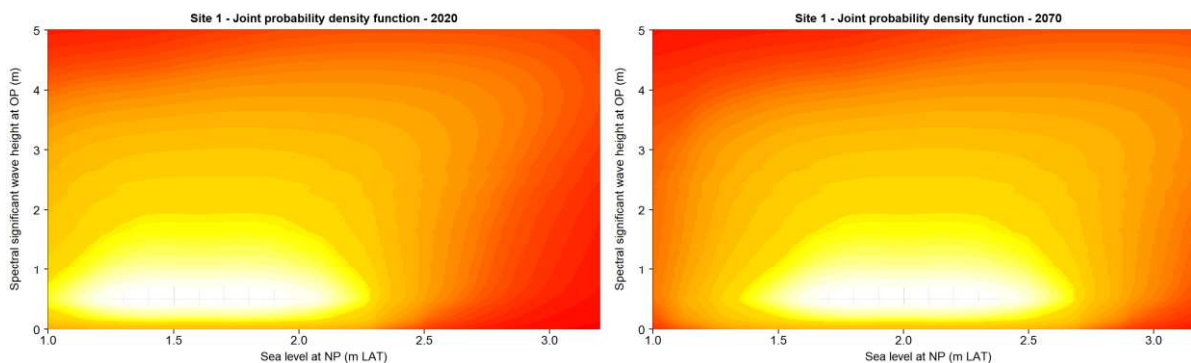


Figure 4 : Décalage de la fonction de densité de probabilité au cours de la durée de vie de l'ouvrage

Ainsi, pour tout couple (X, Z) , on peut calculer $\mathbb{P}[X > x, Z > z]$ pour chaque année et donc la probabilité de rencontre \mathbb{P}_E associée. Un couple choisi sur le contour de période de retour bivariable 100

ans dans l'état actuel aura donc au final une probabilité de rencontre bien plus élevée que 0,39 (pour une durée de vie de 50 ans), qui pourra même approcher 1, ce qui signifierait que la remontée eustatique rendrait quasiment inéluctable la rencontre de l'évènement dimensionnant dans la vie de l'ouvrage.

On choisit donc un couple situé sur le contour d'intérêt (en pratique, mieux vaut privilégier la partie verticale du contour correspond à un H_s de faible période de retour et à un niveau Z de forte période de retour), puis par un processus itératif, il est alors possible de déterminer la valeur δZ_{SLR} , comprise entre 0 et δZ_D , permettant de retrouver la probabilité de rencontre du cas stationnaire.

Il est cependant à noter que pour un contour donné, la valeur du décalage est variable le long du contour. Ainsi, la *Figure 5* montre : tout à droite en magenta, le décalage du contour centennal correspondant à la remontée eustatique en fin de vie de l'ouvrage (pratique d'ingénierie actuelle) ; plus à gauche en marron, le décalage du contour entier basé sur un unique couple situé sur la partie verticale du couple (période de retour marginale en H_s de 0,1 an) ; enfin un peu plus à gauche en rose, le décalage du contour basé sur un calcul sur un très grand nombre de couples le long du contour. Dans la zone de forte courbure, où les deux variables ont simultanément une période de retour marginale assez élevée, le décalage est nettement moindre. Cependant, à ce stade, il est recommandé de s'en tenir au décalage calculé sur la partie verticale du contour, de manière à garder un peu de conservatisme. Dans l'exemple ci-dessous, le décalage final δZ_{SLR} vaut 0,24 m, contre une remontée en fin de vie δZ_D de 0,40 m.

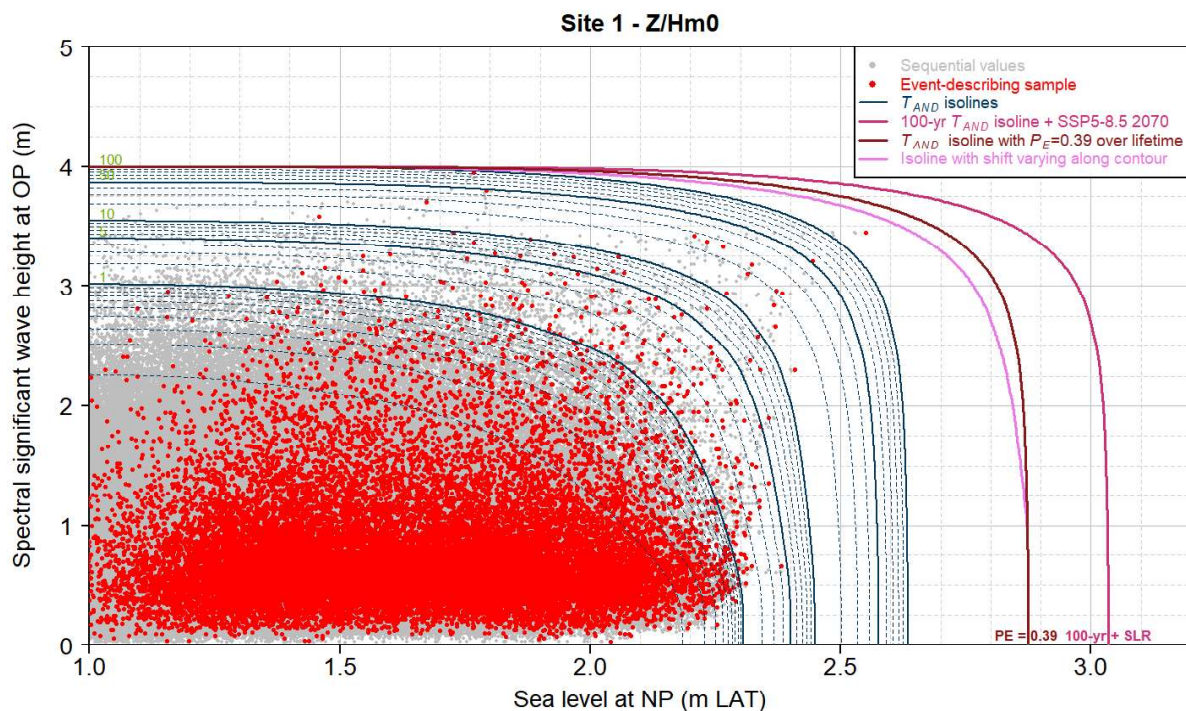


Figure 5 : Décalage du contour de période de retour conjointe 100 ans (constant ou variable le long du contour) pour conserver une probabilité de rencontre de 39 % sur la durée de vie du projet

3. Conclusion et perspectives

L'approche par la probabilité de rencontre ici proposée est basée sur un aléa évalué sur toute la durée de vie du projet, et peut ainsi se décliner dans le cadre stationnaire (pour lequel raisonner sur \mathbb{P}_E est déjà recommandé) tout comme dans le cadre instationnaire.

Elle permet de prendre pleinement en compte les effets attendus de la remontée eustatique du niveau moyen, tout en évitant un surdimensionnement et ses conséquences : surcoût économique, durée des travaux, surconsommation des matériaux (béton, enrochements...), empreinte visuelle...

Elle permet également d'envisager une structure adaptative (facilement reprise en cours de durée de vie), au fur et à mesure que l'élévation du niveau de la mer, sujette à de très fortes incertitudes au stade de la conception, se précise : quais en escalier, murs de couronnement réhaussables, ajout ultérieur d'un mur chasse-mer...

Il est néanmoins toujours nécessaire de garder un certain nombre de points à l'esprit lors de la prise en compte de la remontée eustatique dans les analyses bivariées houle / niveau, que ce soit de manière simplifiée ou par cette approche plus sophistiquée.



Le premier point est l'attention devant être portée à la dépendance houle-niveau liée à la hauteur d'eau lors de la propagation au pied de l'ouvrage, surtout si celui-ci se situe dans la zone de déferlement. Il faut alors choisir avec soin son point d'analyse.

Le second est que l'élévation du niveau marin ne mènera pas forcément toujours à une réponse de l'ouvrage plus pénalisante : ainsi, l'effort sur un mur vertical pourrait passer d'un régime impactant à un régime non-impactant si l'augmentation de la profondeur retarde le déferlement.

Le troisième point consiste à être conscient que dans l'idéal, le dimensionnement d'un ouvrage devrait reposer sur une approche probabiliste basée sur les réponses plutôt que sur les actions. C'est la difficulté pratique de passer des actions aux réponses sur la très grande variété des combinaisons de paramètres météo-océaniques lors de la vie de l'ouvrage qui force l'utilisation de probabilités bivariées houle-niveau. Poussant ce raisonnement un peu plus loin, il est alors visible qu'il serait plus souhaitable de conserver une probabilité de dommage (basée sur la réponse) constante sur la durée de vie plutôt qu'une probabilité de rencontre (basée sur les actions). Dans la plupart des cas, l'estimation précise de cette autre probabilité semble impossible en pratique, mais cela doit nous pousser à rester encore prudents dans les raffinements proposés : d'où notre recommandation de décaler l'ensemble du contour de la valeur maximale estimée dans sa partie verticale, plutôt que de faire varier le décalage le long du contour (*Figure 5*).

Enfin, s'il n'a ici été examiné que la variation de la probabilité bivariée liée à la remontée eustatique, par un simple décalage de la distribution marginale du niveau, cette approche ouvre la voie à des modifications plus élaborées puisqu'il est tout à fait possible d'intégrer une probabilité marginale des hauteurs d'états de mer variant au cours du temps, et / ou une modification de la forme de la probabilité marginale des niveaux marins, qui traduirait un changement du régime de marée et / ou de surcotes.

Références

- [1] Mazas, F., & Hamm, L. (2017). An event-based approach for extreme joint probabilities of waves and sea levels. *Coastal Engineering*, 122, 44-59.
- [2] Mazas, F. (2019). Extreme events: a framework for assessing natural hazards. *Natural Hazards*, 98(3), 823-848.
- [3] Serinaldi, F. (2015). Dismissing return periods!. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 29, 1179-1189.
- [4] Hawkes, P. J., Gouldby, B. P., Tawn, J. A., & Owen, M. W. (2002). The joint probability of waves and water levels in coastal engineering design. *Journal of hydraulic research*, 40(3), 241-251.



Mediterranean Days - October 24th to 26th 2023 Sete FRANCE

Ref. Author:

Serena D'Amora, Ph.D. - serenadamora80@gmail.com - Roma, Italy

Co-author:

**Andrea Ferrante – High Council of Public Works - Ministry of Infrastructure and Transport -
andrea.ferrante@mit.gov.it
Via Nomentana, 2, Roma, Italy**

Keywords: port planning, port masterplan, flexibility

Efficiency and flexibility in port masterplans by means of Technical Functional Adaptations. The Italian experience.

Abstract

In 1994, Italian law n. 84 introduced an updated administrative discipline of the port masterplan. The port masterplan designs port layout and the retro-port areas and it defines their functions. Before its final approval by the Port Authority, it's subjected to the technical assessment of the High Council of Public Works and to the Strategic Environmental Assessment of the Ministry of the Environment, in order to evaluate its effects on the environment, in compliance with Directive 2001/42/EC.

The procedure follows complex phases and it is time consuming, contrasting with the need for fast adaptation and modifications of the port infrastructure, in order to pursue the pressing demands of the market due to the evolution of maritime traffic and ships.

Potential substantial changes in the approved port masterplan (changes in the strategic objectives of the plan, which can imply impacts on the environment) must go through the administrative procedure of the plan itself again. Such a long and demanding process has shown, over time, the need to identify timely and flexible methods/tools in the case non-substantial changes in the port masterplan.

Therefore, a specific law in 2016 has introduced the so called “technical functional adaptation” tool. It is associated with a simplified approval process, according to a principle of proportionality between the importance and extent of the changes introduced in the port masterplan and the level of complexity of the related administrative procedure.

The technical functional adaptation tool is applied to non-substantial changes, which do not alter significantly the structure of the port masterplan in terms of objectives and of main strategic choices. Moreover, these changes must not be relevant from an environmental point of view, as they should not entail the initiation of environmental assessment procedures.

The undeniable procedural simplifications introduced by the technical functional adaptation tool have made possible, over time, to identify timely solutions to the ports' need in order to modify the contents of the port masterplan in a non-substantial way.

This paper intends to provide a general overview of the introduced matter, also outlining a typological classification, deriving from the most relevant case studies that have been recorded at national level.

1. Introduction and objectives of the paper

The new discipline on the port masterplan was introduced in Italy in 1994 with law n. 84, thus attributing to it contents and methods completely equivalent to those already in use in traditional urban planning. This is achieved through an organic discipline in terms of port layout and functions.

The mentioned law assigns to the port masterplan the role of instrument for governing port territory in a flexible way, which is well suited to the fast evolution of maritime traffic and of infrastructural needs.

It strategically defines the different functions of port areas, identifying:

- its more autonomous and specialized areas (operational port areas);
- areas of interaction between the port and the city (port-city interaction areas);
- areas located behind the port (for example, distriparks and logistics terminals);
- corridors of infrastructural connection with the urban area and the territory.

The approval of the port masterplan and of its main “**variants**” (i.e. the **substantial changes** in the port masterplan, which significantly impact objectives and main strategic choices of the plan, also in environmental terms) goes through a rather complex administrative procedure.

The procedure starts with the adoption by the Port Authority, passing through the technical assessment of the High Council of Public Works, and it ends with the **Strategic Environmental Assessment (SEA)** at the Ministry of the Environment. Therefore, the procedure involves quite a long time, not always compatible with the pressing needs of the maritime traffic, which very often make necessary the realization of specific infrastructural works.

Because of that, it arose the need of identifying a streamlined approval discipline for **non-substantial changes** in the port masterplan, which do not constitute a “**variant**” of the masterplan itself.

They can essentially be traced back to non-substantial changes:

- to the port layout (including port depths);
- to port zoning (functions in port areas).

Therefore, thanks to a law [1] promulgated in 2016, the **technical functional adaptation (TFA)** to the port masterplan was introduced. As already outlined, it is a technical tool that is applied when the changes introduced to the port masterplan do not substantially alter the structure of the masterplan itself in terms of objectives, main strategic choices and they do not have significant environmental relevance.

Therefore, a **TFA is excluded from the SEA procedure**, introduced by Directive 2001/42/EC.

Two different main types of TFA can be conceived:

- a) those related to **non-substantial changes in the contents of the port masterplan** (layout and functional zoning of port areas), **at planning level**.
- b) those related to **non-substantial changes in the infrastructural works, at design level**.

The present paper is mainly focused on “type a)” TFAs.

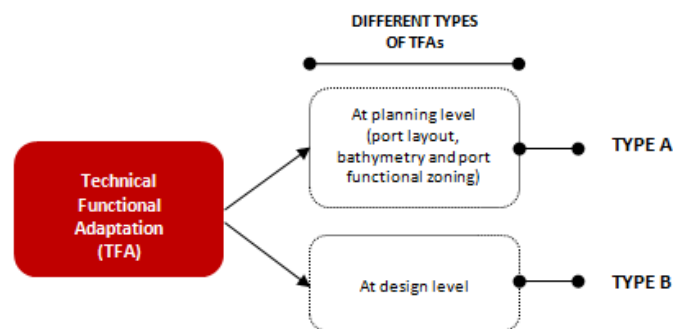


Figure 1- Types of TFAs

The principle that guided the introduction of the TFA tool to the port masterplan, responds to a need for proportionality between the importance and extent of changes introduced in the port masterplan and the level of complexity of the related administrative procedure.

This is clearly underlined within the “Guidelines for the drafting of port masterplans” of the High Council of Public Works (2017). [2]

The introduction of the TFA tool has met a wide and successful application by the Port Authorities, with the implementation of several technical assessment procedures by the High Council of Public Works in a relatively short time.

The non-subjectability of the TFA to SEA procedure has allowed significant time savings in the carrying out of the related infrastructural works, thus offering the highly desired flexibility to the port masterplan.

The several procedures activated at national level, have made possible to identify a first typological classification of “type a)” TFAs (related to practical case studies), which can be reasonably enlarged to other hypotheses of potential TFAs.

Therefore, the typological classification proposed in this paper constitutes a proposal to be evaluated in the current updating phase of the “Guidelines for the drafting of port masterplans” of the High Council of Public Works.

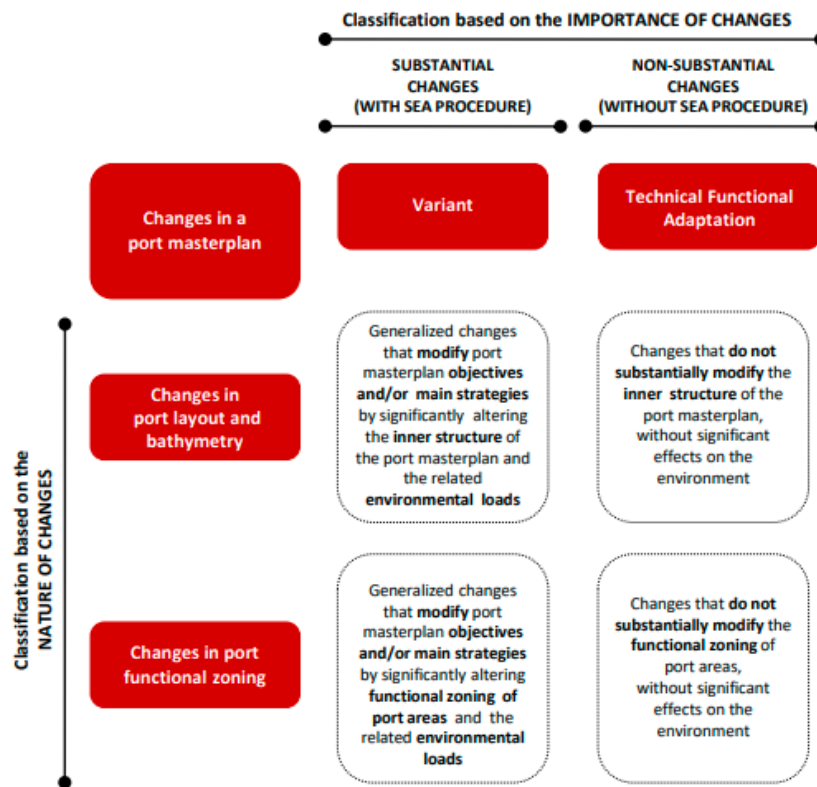


Figure 2- Domain of changes in a port masterplan

2. Proposal for a typological classification of “type a)” Technical Functional Adaptations

As already mentioned, the typological classification of “type a)” TFAs, which is proposed in this paper, takes into account:

- case studies already faced and solved;
- further potentially applicable TFA cases. For example, non-substantial changes that concern the energy efficiency of the port and the port-city relationship, taking into account the sustainability objectives of the “UN 2030 Agenda”. [3]

For each typology of TFA identified below, it is reported:

- a short definition;
- a description of its main contents, together with examples and useful addresses for the drafting of the TFA (in some cases);
- when relevant, references to specific Sustainable Development Goals (SDGs) and to the macro environmental sustainability objectives outlined in “EU Regulation 2020/852” [4] (taxonomy of eco-compatible economic activities).

In fact, for some specific typologies, TFAs contribute to the achievement of the following SDGs:



Goal 7 «Clean and accessible energy»;



Goal 11 «Sustainable cities and communities»;

Related to the environmental sustainability objectives of “EU Regulation 2020/852”, specific typologies of TFAs can usefully contribute to:



mitigation of climate change;



transition towards a circular economy, also with reference to the reduction and recycling of waste.

Typology 1

Non-substantial changes in the layout of external works



EU Regulation 2020/852



These TFAs deal with recalibrations of the layout of the approach channel and of the breakwaters. For example, through the shortening of the secondary breakwater and/or the extension of the main breakwater, without significant changes in the general layout of the port and of its functions. These TFAs can be necessary if a new “project ship” is envisaged.

TFAs belonging to this typology can be proposed in order to improve navigation safety, too.

The implementation of a “*real time full mission*” ship simulator represents an extremely useful tool for the technical optimization of the re-designed approach channel.

At the same time, a numerical model of inner refraction/diffraction can be conveniently implemented in order to verify that the inevitable worsening of inner wave motion doesn’t exceed assigned thresholds of admissibility.

Typology 2

Non-substantial changes in the layout of inner works



These TFAs deal with recalibrations of the layout of inner works of the port.

For example, the introduction of new ro-ro berths, shortening or extension of existing quays.

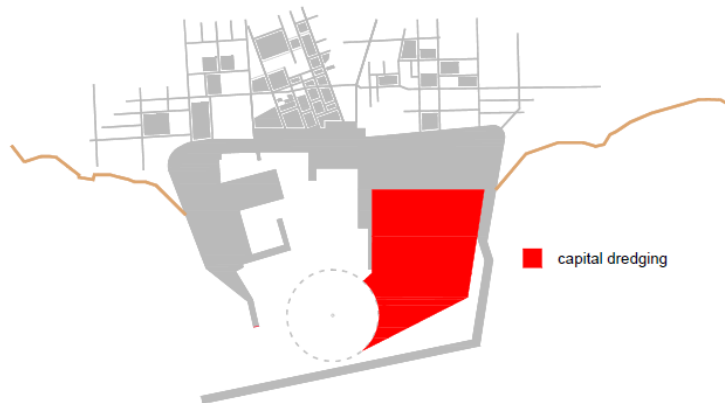
Obviously, the recalibration must not modify the general layout of the port masterplan.

Also in this case, these TFAs can be necessary if a new “project ship” is envisaged.

TFAs of this typology may require, among other aspects, in-depth analysis of geotechnical and structural aspects.

Typology 3

Non-substantial changes in port depths



EU Regulation 2020/852



These TFAs deal with changes that may affect the approach channel, the evolution basin, docks and, indirectly, the related quay structure.

However, the recalibration must not modify the general layout of the port masterplan.

Also in this case, these TFAs can be necessary if a new “project ship” is envisaged, with higher draft. For TFAs of this typology:

- the deepening of port depths at the toe of quay structure may require that the structural and geotechnical stability of quay structure should be verified beforehand;
- in case that the existing quay structure has not been designed for the new depths, it is necessary to foresee a structural consolidation project, together with the TFA;
- with reference to the nature of material to be dredged, it's possible to evaluate the opportunity (following a specific characterization campaign) of re-using dredged material itself (when possible, for beach nourishment projects or for its disposal in dredged material facilities). This activity is coherent with the principles of the circular economy and it pursues one of the main objectives of EU Regulation 2020/852. These proposed TFAs may find synergies with TFAs of typology 4.

Typology 4

Non-substantial changes in port layout for the planning of a new dredged material disposal facility



EU Regulation 2020/852



The need to foresee a new dredged material disposal facility can be determined by the necessity of assuring a proper disposal site to both capital and maintenance dredging.

TFAs of this typology can deal with it.

Once the dredged material facility is totally filled, it should be highlighted that it will be possible (after a proper geotechnical consolidation, where possible) to expand port operational areas, including former dredged material disposal facility area.

The assignment of a specific function in this new port operational area should be considered as a “variant” in the port masterplan.

Typology 5

Non-substantial changes in the functional characterization of specific port areas

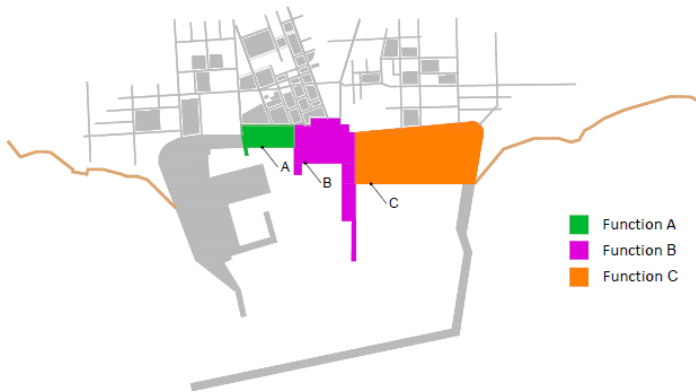
These TFAs deal with the introduction, in specific port areas, of new functions compatible with the pre-existing ones.

In particular, the following cases are highlighted:

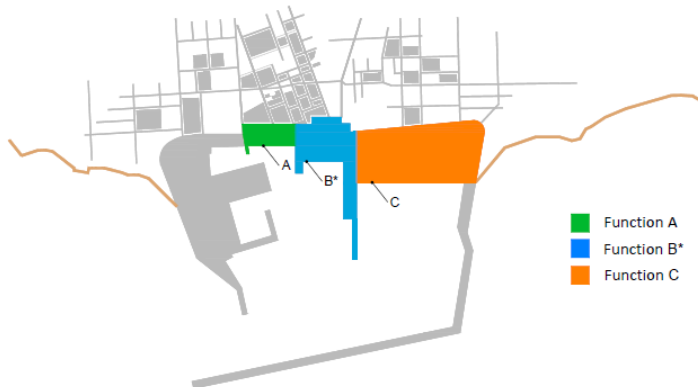
Typology 5.1

Non-substantial functional change in an “old” port masterplan

Port masterplan in force



TFA



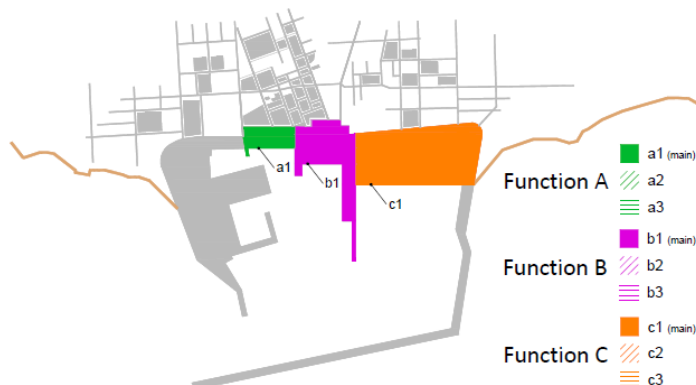
In the Italian legislative contest, “old” port masterplan means that, in each port area, only a specific function is assigned. In the “updated” port masterplan, conversely, a “family of compatible functions” can be assigned in each port area. More precisely: main function (i.e. the operational function) + compatible alternative functions (potential functions). Therefore, these TFAs deal with the assignment of a new function in a specific port area, in replacement of the existing one. The necessary conditions for the admissibility of these TFAs are:

- the non-substantiality of the functional change introduced in the specific port area (B*);
- the compatibility between the new function and the functions of the adjacent port areas (A and C);
- the non-relevance of the functional change from an environmental point of view.

Typology 5.2

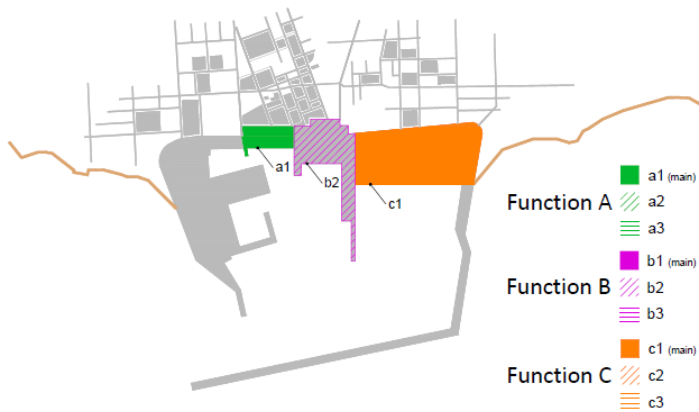
Non-substantial functional change in an “updated” port masterplan

Port masterplan in force



These TFAs deals with the assignment of a new function in a specific port area, characterized by a family of compatible functions. In these cases, the new function belongs to that family, being one of the “compatible alternative functions”. For these TFAs, the necessary conditions of typology 5.1 are already implicitly satisfied.

TFA



Typology 5.3

Re-perimeterization of adjacent port areas

Port masterplan in force



These TFAs deal with the potential necessity of re-perimeterization of adjacent port areas, in order to give a timely answer to the changing needs of port traffic with time. Original functions of port areas are maintained.

TFA



Typology 5.4

Inversion of functions in specific port areas

Port masterplan in force



These TFAs deal with the potential necessity of exchanging functions (when possible) in specific port areas, due to emerging needs. For example, in the case of a project aiming for a waterfront redevelopment in an urban area (see typology 7), a TFA of this typology can reach the desired goal of assuring more compatible functions (with a lower environmental and acoustic impact) in the port areas which are strictly connected to the waterfront project itself.

TFA



Typology 6

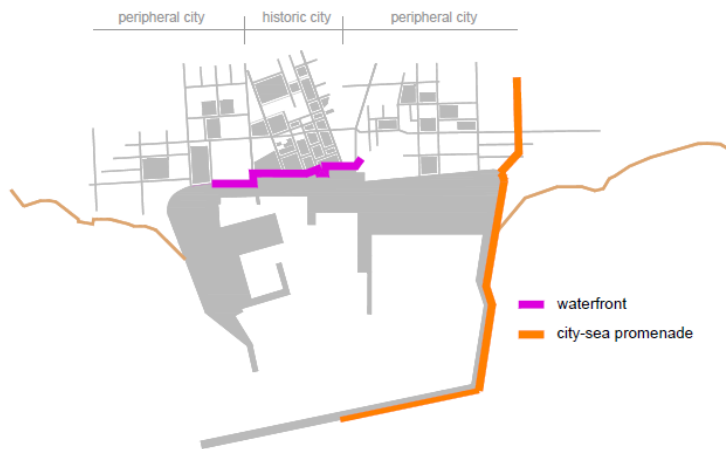
Relocation of port services (service boats berths, control tower...)



These TFAs deal with the potential necessity of relocate port services. For example, relocation and merging can represent an efficient strategy in order to rationalize port services, under both a logistical and an operational point of view. All that can occur, for example, in historic port areas, where sometimes port services developed over time in a widespread way.

Typology 7

Waterfront redevelopment



Contribution to UN 2030 Agenda



These TFAs deal with non-substantial changes that affect specific port areas, belonging to port-city interaction domain.

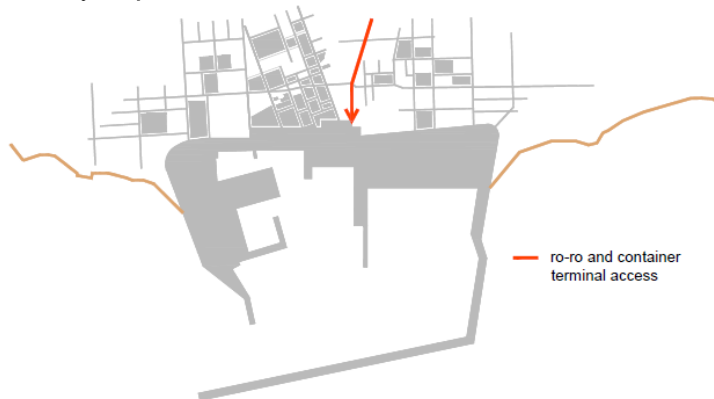
They are aimed for improving the use and the quality of urban places, as well as pedestrian accessibility from the core of the urban area.

The elements that contribute to the improvement of the port-city interaction domain are generally represented by «city-sea promenades» and «waterfronts». By «city-sea promenades» one means route directions that guarantee the physical and social link between the city and the port areas that are more permeable and more compatible with urban flows and activities, set on trajectories and lines usually **orthogonal** to the coast. By «waterfronts» one means the openings of the city onto the port, usually set **parallel** to the coast. In both cases, these TFAs can allow new connections between the urban textures and the port infrastructure. [5]

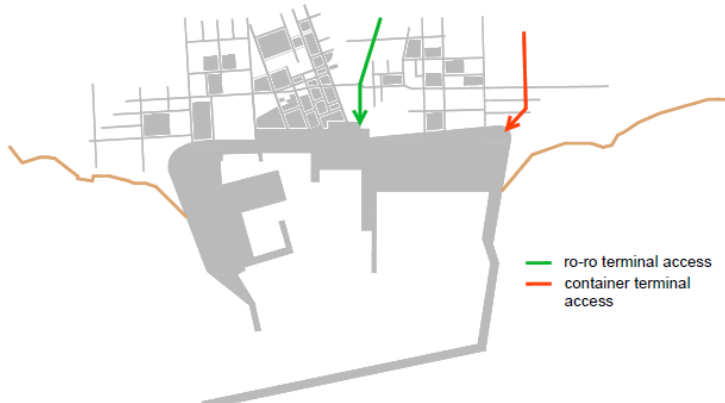
Typology 8

Non-substantial modification of rail/road last mile connection

Port masterplan in force



TFA



Contribution to UN 2030 Agenda



These TFAs deal with non-substantial modifications to the last mile connections between the port and the local territory, in order to improve the conditions of efficiency and safety of the connections themselves.

For example, a possible technical adaptation could be the separation of “light traffic” (ferry, cruise and cruise ferry terminals) from “heavy traffic” (ro-ro, containers...). These changes usually imply the partial re-design of internal port road network and the need of relocating customs gates.

Typology 9

Non-substantial changes in the energy planning of the port masterplan



The basic condition for the application of these TFAs is that port masterplan faces issues of energy planning of the port, both in terms of efficiency and in terms of implementation of renewable energy devices. As far as energy efficiency is concerned, TFAs can be considered, for example through the extension of the already existing electric onshore supply. Regarding the implementation of renewable energy devices, the further installation of devices can be considered a TFA. For example, along the main breakwater (wind energy and/or wave energy plants).

Contribution to UN 2030 Agenda



EU Regulation 2020/852



Regarding **technical functional adaptations of type b)** (which are not regulated by a specific law) they are faced only at design level. Therefore, they do not affect the contents of the port masterplan.

Among them, just to give some practical examples:

- quay renovation. Potential planimetric variation of the quay is a necessary technical consequence of the execution of the related works, completely negligible in the broader perspective of the port masterplan;
- non-substantial changes, at a design level, in order to face climate change (within the main goal of climate change adaptation). For example, by raising the crest level of the main breakwater crown wall;
- temporary works in order to increase port efficiency in some periods of the year (for example, installation of floating pontoons in order to increase the number of berths for ro-ro units, floating breakwaters...).

3. Conclusion

The described typological classification for TFAs may represent a common methodological basis for coherent formulations of TFAs proposals.

At the same time, related technical-administrative procedures for the approval of TFAs could be more efficient, less time consuming.

Furthermore, whenever possible, conceptual relationships between TFAs and the sustainable development objectives of the UN 2030 Agenda and the environmental objectives of the EU Regulation 2020/852 were highlighted.

[1] Italian Government, 2016. *Legislative Decree 4 August 2016, n. 169, Reorganisation, rationalization and simplification of the regulations concerning the port authorities referred to in law 28 January 1994, n. 84, implementing article 8, paragraph 1, letter f), of law 7 August 2015, n. 124.* Rome.

[2] High Council of Public Works of the Ministry of Infrastructure and Transport, 2017. *Guidelines for the drafting of port masterplans.* Rome.

[3] United Nations, 2015. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.* Paris.

[4] European Parliament, & European Council, 2020. *Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088.*

[5] Hoyle B. S., Pinder D. A., Husain M. S., 1988. *"Port areas and urban transformations"*, Mursia, Venezia.

PIANC W211 – The new guidelines for the design of fender systems

M. Gaal¹, E. Broos²

¹ Trelleborg Marine Fenders, The Netherlands; marco.gaal@trelleborg.com

² Port of Rotterdam Authority, The Netherlands

Summary

To protect the ship against the berth or the berth against the ship, often a fender system is installed to absorb the energy of the berthing ship. In 2002 PIANC MarCom Working Group 33 published the 'Guidelines for the Design of Fenders Systems: 2002', shortly WG33. This WG33 report is valuable but on various aspects outdated. PIANC started a new working group, WG211, with the task to update the fender design guidelines.

This paper presents an overview of the task of WG211, the structure of the new guidelines and a summary of the major changes compared to the old guidelines.

Keywords: Fenders, Berthing Energy, PIANC WG211, PIANC WG33

1. START OF WG211

On June 1st, 2018 the PIANC head Quarters asked for volunteers to man the new MarCom Working Group 211 "Update of WG 33 – Guidelines for the design of fender systems". Briefly WG211. WG211 started the works March 2019 and is intended to deliver the report at the end of 2023.

The final report is essentially a new report and not an update. The WG211 guidelines when finished will supersede the previous PIANC MARCOM WG33 and WG145 working group reports, and also all fender and berthing related paragraphs in other PIANC reports.

The new report is intended to be named: 'PIANC Fender Guidelines 2023' in short, abbreviated as PFG23. The formal full reference is intended to become: 'PIANC MarCom WG211 report Guidelines on Design, Manufacturing and Testing of Fender Systems 2023'

2. TERMS OF REFERENCE OF WG211

The full terms of reference can be found on the PIANC website www.pianc.org. It asked for a general update of WG33 including:

- alignment with current practice including reliability design methods (semi) probabilistic approach;
- latest simulation software for evaluation of fender/vessel interaction;
- recent vessel trends including increases in vessel sizes, developments in hull shapes and the implications for fender engagement;
- vertical and horizontal forces on fender;
- hull pressures;

- outline consideration of special issues applying to wheel fenders and foam filled fenders;
- WG145 output regarding berthing velocities and angles, reliability design, hull flare angles on large container vessels;
- Verifying all relevant standards newer than WG33 with respect to fender design, manufacturing and testing.

3. CONTENTS OF WG211 REPORT

The report is structured in 13 chapters. The chapters are clustered by subject, and presented Appendix A. The chapters are in a logical order covering the life cycle of a fender from basic principles to design, fabrication, installation and eventually recycling at the end of life.

3.1 Introduction and General Aspects

This introduction set outs the scope and function of the WG211 report.

3.2 Introduction to the Principles of Fendering

This chapter provides an overview of the typical characteristics of a range of fenders and fender systems currently in use around the world. It also provides an overview of the general fender selection and design approach.

3.3 Particular Aspects Regarding Design Vessels

This chapter deals with the specific fender – vessel issues for various vessel classes. This chapter heavily leans on the work of WG235 Typical Ship

Dimensions. WG235 is a spinoff of WG211 and will be separately presented on Ports'22.

3.4 Basis of Design

This chapter establishes the parameters that should be taken into consideration in the design of a fender system. The chapter can be used as a roadmap for the design process or as a template to develop a basis of design document to document the various parameters that will affect the design.

A new element is a reliability based design approach is line with most international design codes. This chapter also includes guidance on Consequence classes based on failure consequences.

3.5 Berthing Energy

Once the design parameters are established the berthing energy can be determined. Together with 'Fender System Selection' and "Test Procedure of Marine Fenders" this is one of the key chapter of this document.

WG211 will introduce new terminology such as Characteristic berthing Energy ($E_{k,c}$), Partial Energy Factor γ_E and Design Berthing Energy ($E_{k,d}$).

One of the key parameters to be established in the design process are the Navigation Conditions at berth. The Navigation Conditions have a large impact on the Berthing Energy as it impact the speed berthing (if not known) as we;; as the Partial Energy Factor.

Reliability based design introduces some new parameters to be considered such as berthing frequency and variation in displacement.

The works of WG145 are incorporated into this chapter and provide guidance on berthing speeds however PIANC WG211 strongly recommends to obtain site specific information and experience to determine the berthing speed.

There will be a separation between single fender contact, as often the case with mooring dolphins, and multiple fender contact, typically for container terminals and other facilities with flexible berths.

3.6 Fender System Selection

This Chapter outlines the fender selection process, providing background information on the issues that should be considered when selecting a fender system. The selection of a fender system deserves as much attention as the design of any other element of the structure of which it is a part. The selection of the fender, the type of fender system

and the supporting structure are therefore interlinked.

WG211 introduces Base Performance of the selected fenders as well as Characteristic performance by applying correction factors to the Base Performance and Design Performance by applying the Partial Safety Factors to the Characteristic Performance. Reference is made to Appendix B.

'Fender system design' also considers the effects of multiple fender contact as well as various other factors that impact the fender selection such as hull pressure, fender orientation, submerged fenders and more.

3.7 Fender Selection Under Moored Conditions

This Chapter outlines the design considerations that are applicable for fender systems that are required to accommodate moored vessels. A wide variety of conditions can affect the dynamic response of a vessel. These conditions can induce the movement of a moored vessel, indicated by the cyclic movements in the six degrees of freedom. These movements can subsequently induce cyclic loading within the different elements of the mooring and fender system. As mooring arrangements are dynamic, a careful assessment should be undertaken to establish the effects on the moored vessel.

3.8 Fender Systems Components Design

This chapter outlines the fender system components design process, providing background information on the issues that should be considered when designing these key elements of the fender system.

3.9 Manufacturing of Fender Systems

'Manufacturing Of Fender Systems' explains in brief how fender bodies (rubber and foam) are made and what ingredients can be used. Secondly it deals with the manufacturing of panels and accessories, so mainly steel and UHMW-PE.

3.10 Test Procedure of Marine Fenders

'Test Procedures Of Marine Fenders' is an important improvement compared to WG33 and deals with testing of rubber elements primarily and accessories secondary. This chapter 10 will significantly improve the quality of fenders if used properly. It covers various types of testing such as performance and durability testing as well as detailed protocols to support the testing. Besides

rubber fenders this chapter now also addresses the testing of foam fenders.

3.11 Installation, Inspection and Maintenance

This chapter provides insights in key elements to consider during installation, inspection and Maintenance.

3.12 Sustainability of Fenders

‘Sustainability of Fenders’ explains the possibilities and challenges of considering sustainability when designing fender systems and recycling of fender systems at the end of its service life based on today's possibilities.

3.13 Specification Writing

The final chapter of the report assist the reader in making a good specification for her or his own tendering procedure.

4. SPECIFIC SUBJECTS OF GENERAL INTEREST

The new WG211 is a significant change compared to the WG33. Some notable changes are addressed below;

4.1 Hull Pressure

Still under discussion is the subject of allowable hull pressure. The table with allowable hull pressures as is currently part of the WG33 report misses any physical base. All research despite, a real governing global valid criterion has not yet been established. Berendsen (2022) provided some new insights which are now included into the WG211 report.

4.2 Berthing Angles

Berthing angles in WG211 will be significantly lower based on measurements done by WG145. Every port visitor can observe that ships are often berth parallel to the quay.

4.3 Multiple Fender Contact

With low berthing angles vessels will very often engaged more than one fender. This multiple fender

contact is one of the key elements that make that severe under designed fenders still can be used by very large ships. The new guideline will provide this multiple fender contact, that will probably the standard approach for container terminals with continuous berths.

4.4 WG33 versus WG211 outcomes

In general one can state that fenders designed under WG33 fulfil their task pretty well. Based on research, e.g. WG145 and based on observations, designers know that the theory of WG33 does often not match the daily practise. WG211 tries to match theory with practise. But WG211 should not result in heavier fenders under normal conditions. Roubos (2023) demonstrated that generally fender sizes remain the same except for jetties in Unfavourable conditions.

5. INVOLVED PARTIES IN WG211

The Working Group contains a broad representation of the PIANC community. The table below shows the involved members, alternating members and YP's, their member state and their company. As one can see the list is a mixture of manufactures, consultants, research institutes, one contractor, a retired Captain and three fender owners. The list is sorted by family name. Readers with interest in the subject can contact their local representative in WG211.



Figure 1 WG211 Meeting 14 in Baltimore, visit to Trelleborg's foam fender factory (Source: Trelleborg (2023)).

Name	Representing	Company
Dr. Hitoshi Akiyama	Japan	Coastal Development Institute of Technology
Capt. Dennis Barber	UK	Dennis Barber Marine Consulting
Mr. Erik Broos (Chairman)	Platinum Partner	Port of Rotterdam
Mr. Marco Gaal	The Netherlands	Trelleborg
Mr. Gary Greene	US	Gary Green Engineers
Mr. Chistian Hein	Germany	Bremenports GmbH&Co.KG

PIANC Mediterranean Days – Sete 25-27 October 2023

PIANC WG211 – The new guidelines for the design of fender systems

M. Gaal, E. Broos

Mr. Rune Iversen	US	Simpson Gumpertz & Heger
Mr. Mishra Kumar	Platinum Partner	Trelleborg
Mr. Patrick Lambiotte	Belgium	Besix
Mr. Bob Lamont-Smith	Australia	E & PI Consultants
Mr. Luis Lopez Gonzalez	Spain	Siport21
Mr. Masamitsu Ikebe	Japan	Shibata Industrial
Mr. Vitomir Mihajlovic	Spain	Prosertek
Mrs. Prasanthi Mirihagalla	UK	AECOM
Mr. Svein Ove Nyvoll	Norway	Nyvoll Consult
Mr. Jeff Oskamp	US	Moffatt & Nichol Engineers
Mr. Dominique Polte	Platinum Partner	Shibata Fender Team
Mr. Eduardo Rodero Aristoy	Spain	ShibataFenderTeam
Dr. Alfred Roubos (secretary)	The Netherlands	Port of Rotterdam
Mr. Sergej Sergijenko	UK	Royal HaskoningDHV
Mr. Harvinder Singh	Australia	JACOBS
Dr. Ueda	Japan	IDEA Consultants, Inc.
Mr. Arjan Van der Weck (mentor)	MarCom	Boskalis
Mr. Rob Williams (editor)	UK	Waves Group
Mr. NG Yeow Kiat	Malaysia	ExxonMobil / OCIMF
Dr. Haruo Yoneyama	Japan	Port and Airport Research Institute
Mr. Soonhwan Yun	South Korea	Hwaseung Exwill Co.

6. CONCLUSION

The reader familiar with the existing WG33 Guidelines must be aware that the WG211 report will be a complete new report. The major issues are explained in separate chapters at the Ports'22 conference.

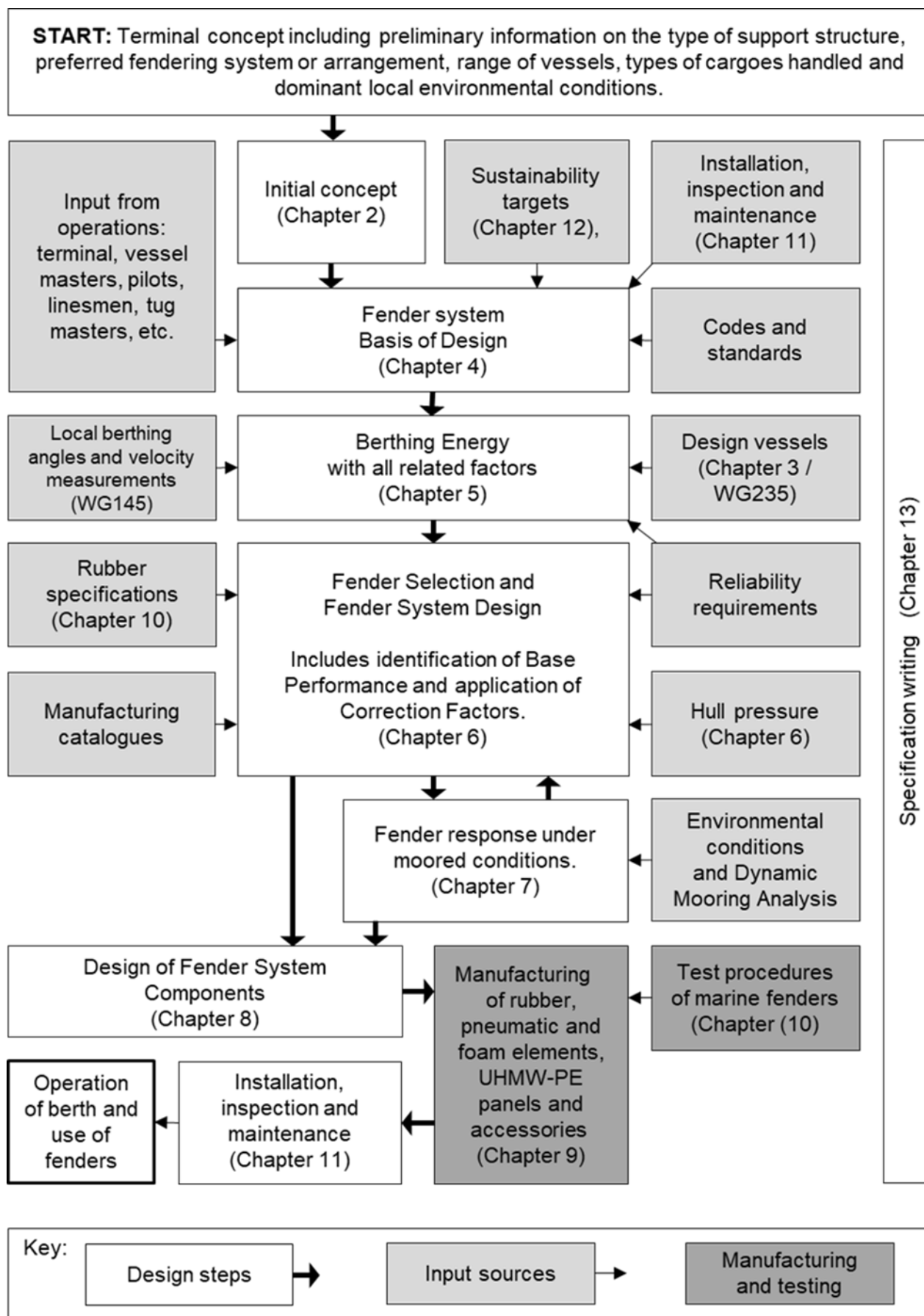
7. REFERENCES

This paper is mainly based on the paper "The new PIANC guidelines for the design of fender systems 2022 by WG211" by E.J. Broos (2021) et al.

- [1] Berendsen, E. A. (2022). Impact resistance of ship hull to berthing loads: quantifying critical fender impact, Delft University of Technology, November 1, 2022.

- [2] Orlin (2020) Reliability based assessment of fender systems' Master Thesis Delft University of Technology faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft 2020-11-26
- [3] PIANC (2002), Guidelines for the Design of Fender Systems: 2002, report of working group 33 of the Maritime Navigation Commission, Brussels 2002
- [4] PIANC (2020), MarCom WG 145: Berthing velocity analysis of seagoing vessels over 30,000 dwt (2020), Brussels 2020
- [5] Roubos, A. A., Roussel, L., Gaal, M., Blankers, G., Mirihagalla, P., & Groenewegen, P. (2023). Effect of PIANC WG211 design method on fender dimensions. PIANC America 2023 Conference. Fort Lauderdale: PIANC USA.

Appendix A - Overview of WG211 chapter and how the interact



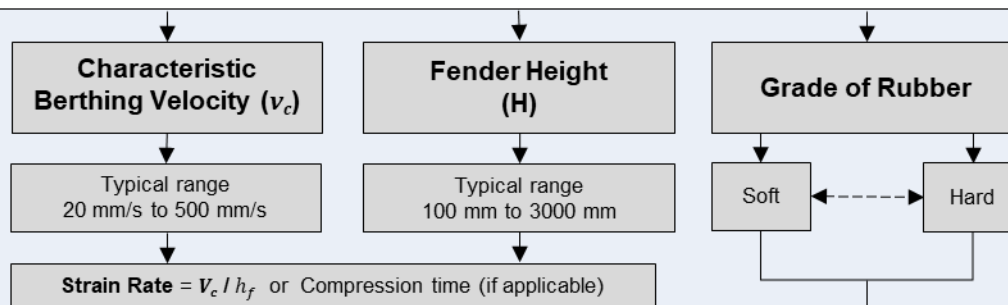
Appendix B - Overview of fender selection process

FENDER SELECTION METHODOLOGY ⁽ⁱ⁾ using project specific design criteria

Project specific design criteria are used to determine the:

- Characteristic berthing velocity (refer to Section 5.4)
- Maximum and minimum average temperatures (refer to Section 6.6.3)
- Design vessel fender compression angle (refer to Section 6.6.4)
- Single or multiple fender contact (refer to Section 6.6.5)
- Assessed consequence class and failure consequence (refer to Section 5.8)

1. Identify the type(s) of fender that are likely to satisfy the project requirements ⁽ⁱⁱ⁾, based on the characteristic berthing velocity, the fender size and grade of rubber (if applicable) ⁽ⁱⁱⁱ⁾.



2. Identify the **Base Performance** of the selected fender(s), (i.e., the energy absorption capacity and the reaction force from the fender supplier catalogues), (refer to Section 6.5).

3. Determine the fender **Characteristic Performance** by applying the **Correction Factors** to the fender **Base Performance** (refer to Section 6.6 and Figure 6-11).

4. Determine the fender **Design Performance** by applying the **Partial Safety Factors** to the fender **Characteristic Performance** (refer Section 6.7 and Figure 6-11).

5. **Verify that:**

- the capacity and capability of the selected fender is greater than the design berthing energy required to be absorbed by the fenders.
- the vessel allowable hull pressure limit is not exceeded by the reaction forces generated by the selected fender.
- the structural load capacities of the load distribution, support and restraint system are greater than the reaction forces generated by the selected fender.
- the permanent mooring performance is satisfied, as noted in chapter 7.

(i) This flow chart provides an overview of the fender selection process. Many factors (in addition to those presented in this flowchart) influence the fender selection process. Refer to Sections 6.4 to 6.8 for further details on the range of factors to be considered.

(ii) At this stage of the fender selection process, the type of fender system is not expected to have been selected. This flow chart is intended to illustrate the process for selecting the type of fender that will satisfy the energy absorption requirements.

(iii) The type of rubber (natural or synthetic or blend of both) can also be considered in the initial selection of the type(s) of fender to be selected.

Auteur principal : DESBOIS Tiffany – tiffany.desbois@cerema.fr – Cerema – 5 rue Jules Vallès 22015 Saint-Brieuc Cedex – France

Co-auteurs :

PETITPREZ Anthony – anthony.petitprez@vnf.fr – VNF – 175 rue Ludovic Boutleux CS30820, 62408 Béthune cedex – France

THAUVIN Benoit – benoit.thauvin@cerema.fr – Cerema - 5 rue Jules Vallès 22015 Saint-Brieuc Cedex – France

LUCHEZ Laurent – laurent.luchez@cerema.fr – Cerema – 134 rue de Beauvais CS 60039, 60280 Margny-Les-Compiègne – France

Mots clés : écluse – analyse du cycle de vie – rénovation – impacts environnementaux

Détermination des impacts environnementaux d'une rénovation d'écluse en vue d'une écoconception des ouvrages

Résumé de l'article :

Le mode de transport fluvial est considéré comme écologique du fait de sa performance énergétique, carbone et environnementale. Aussi, il doit jouer un rôle essentiel pour contribuer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre des infrastructures de transport. Toutefois, les impacts environnementaux associés à la conception et à la modernisation de l'infrastructure fluviale sont mal connus et documentés.

Il apparaît donc nécessaire de disposer d'une connaissance plus fine et d'outils pour évaluer et réduire l'empreinte carbone et plus globalement environnementale des travaux, notamment de modernisation et de rénovation, menés sur les ouvrages fluviaux, dans une approche d'écoconception et d'Analyse du Cycle de Vie (ACV).

Dans ce sens, une étude a été menée sur l'écluse de Don sur la Deûle, dont le gestionnaire est Voies navigables de France (VNF), et qui a fait l'objet de travaux de rénovation. Ce chantier correspondait à des travaux d'envergure, représentatifs des travaux de rénovation couramment réalisés par VNF et comprenant le remplacement des portes amont et aval avec génie civil, vantellerie, organes de manœuvre, l'aménagement du sas, la réfection des terre-pleins, le remplacement des estacades, etc.

La méthode ACV, méthode multi-étapes, qui examine tout le cycle de vie d'un produit ou d'un service et multicritères, qui permet de déterminer des indicateurs d'impacts environnementaux et des indicateurs de flux, a été utilisée afin de déterminer les impacts environnementaux de cette rénovation. L'étude s'est focalisée sur les étapes A1 à A5 telles que définies par la norme NF EN 15804+A1, à savoir jusqu'à la réception du chantier.

Afin d'évaluer l'origine de ces impacts, leur répartition selon quatre postes a été regardée : les matériaux correspondant à la production des matériaux intervenant dans la rénovation ; les

engins correspondant à leur utilisation ; le transport correspondant au transport des matériaux et des engins jusqu'au chantier et les déchets correspondant au traitement des différents déchets générés (déchets amiantés et déblais) et leur transport jusqu'aux centres de traitement.

Cette étude a ainsi amené à des premières recommandations en termes d'écoconception de ce type d'ouvrages et des préconisations pour de futures études de ce type.

Article :

1. Introduction et enjeux

Dans la continuité de l'accord de Paris [1], de la Stratégie nationale Bas Carbone [2] et du plan climat de la France [3], la réduction des émissions carbonées et la réduction des ressources fossiles est un enjeu majeur des politiques publiques. Ainsi en août 2015, la loi de Transition Énergétique pour une Croissance Verte [4] est promulguée. Celle-ci vise à renforcer l'indépendance énergétique et la compétitivité économique de la France, préserver la santé humaine et l'environnement et lutter contre le changement climatique. Elle vise également à promouvoir l'économie circulaire, de la conception des produits à leur recyclage. Pour ce faire, elle stipule des objectifs chiffrés, notamment la réduction des émissions de gaz à effet de serre de 40% entre 1990 et 2030 et la réduction de la consommation énergétique finale de 50% en 2050. Par la suite, le décret n°2017-725 du 3 mai 2017 relatif aux principes et modalités du calcul des émissions de gaz à effet de serre des projets publics [5] a été publié au journal officiel du 5 mai 2017. Enfin, en cohérence avec l'accord de Paris du 12 décembre 2015, ratifié le 5 octobre 2016 et le Pacte vert pour l'Europe, la loi n°2021-1104 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets [6] a été promulguée le 22 août 2021. Elle prévoit dans son article 39 les éléments suivants :

« L'article L. 228-4 du code de l'environnement est complété par un alinéa ainsi rédigé : « A compter du 1er janvier 2030, l'usage des matériaux biosourcés ou bas-carbone intervient dans au moins 25% des rénovations lourdes et des constructions relevant de la commande publique. Un décret en Conseil d'Etat précise les modalités d'application du présent article, en particulier la nature des travaux de rénovation lourde et les seuils au-delà desquels l'obligation est applicable aux acheteurs publics. » »

Du côté plus spécifiquement de la diminution des impacts environnementaux des modes de transport, il est possible de scinder les émissions générées en deux catégories : les émissions liées à l'exploitation des véhicules appelées les impacts directs du transport et les impacts indirects liés au cycle de vie du véhicule (fabrication, maintenance, mise au rebut), à la production de carburant et au cycle de vie de l'infrastructure (construction, exploitation, maintenance, démolition). Il s'avère que cette deuxième catégorie, souvent omise dans les études, peut avoir une contribution significative aux impacts des systèmes de transport. Par exemple, Chester et Horvath [7] ont constaté que ces émissions indirectes pourraient représenter plus de 40 % des émissions totales de Gaz à Effet de Serre du transport routier et ferroviaire.

Les émissions indirectes du transport fluvial sont peu voire pas documentées. Aussi, elles s'avèrent difficile à quantifier et nécessitent des études spécifiques afin d'évaluer leur importance au regard des

émissions directes. De plus, ces études doivent permettre d'écoconcevoir de futurs projets. Les travaux présentés dans cet article s'inscrivent donc dans ce double contexte.

2. Méthodologie employée : l'Analyse du Cycle de Vie

2.1 Introduction

La méthode d'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode multi-étapes, qui examine tout le cycle de vie d'un produit ou d'un service et multicritères, qui permet de déterminer des indicateurs d'impacts environnementaux et des indicateurs de flux. Son objectif principal est ainsi d'éviter les déplacements de pollutions (ex: moins d'impacts à la construction de l'infrastructure mais plus pendant l'entretien). Elle permet d'effectuer des comparaisons, aussi bien entre produits qu'entre phases du cycle de vie d'un même produit, etc., et ce afin d'intégrer une logique d'éco-conception.

Cette méthode est régie par des normes dont les normes internationales NF EN ISO 14040 [8], décrivant le principe et le cadre de l'ACV, et NF EN ISO 14044 [9], stipulant les exigences et les lignes directrices. Ainsi elle comporte quatre étapes dont les liens sont représentés sur le schéma *Figure 1*.

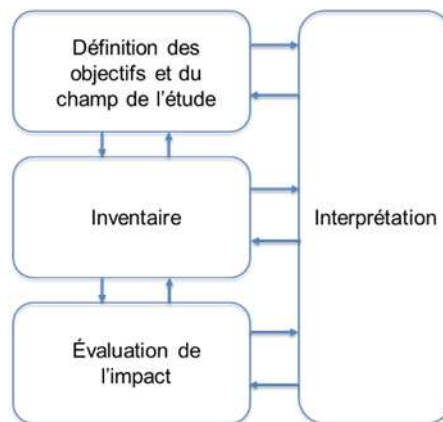


Figure 1 : Étapes de la méthode ACV

L'étape 1 relative à la définition des objectifs et du champ de l'étude permet de

- Délimiter les frontières du système étudié ;
- Choisir l'unité fonctionnelle (unité à laquelle seront rapportés tous les Inventaires du Cycle de Vie – ICV – et impacts) ;
- Émettre des hypothèses sur le système (ex. durée de vie) ;
- Déterminer le public destinataire...

L'étape 2 correspond à l'Inventaire du Cycle de Vie (ICV) qui consiste en l'identification et la quantification des différents flux de matière et d'énergie rentrant et sortant dans le système considéré, en le choix de modélisation...

L'étape 3 est l'évaluation de l'impact où les différents flux recensés lors de l'ICV sont agrégés en impacts environnementaux. Il y a aussi une normalisation et une pondération qui sont à considérer.

La dernière étape, la 4^{ème}, porte sur l'interprétation. Celle-ci se déroule en parallèle et en interaction avec les trois premières étapes. Elle consiste à discuter les résultats et les hypothèses choisies lors des autres étapes. Il est donc souvent nécessaire de faire des recalculs et d'évaluer les conséquences d'une modification dans les hypothèses précédentes à partir notamment d'études de sensibilité. Les choix de représentation des résultats apparaissent également lors de cette étape.

La suite de l'article présente l'étude selon ce découpage par étape.

2.2 Cas d'étude : l'écluse de Don

L'écluse de Don, sur la Deûle, a été rénovée entre 2017 et 2018. Sa rénovation a consisté en plusieurs types de travaux, dont la plupart s'avèrent être des travaux de rénovation « courants » sur les infrastructures fluviales :

- Remplacement de la porte amont : génie civil, vantellerie et organes de manœuvre ;
- Remplacement de la porte aval : enlèvement des vantelleries existantes, déconstruction des tours existantes, reconstruction de la nouvelle porte (génie civil), nouvelle vantellerie et organes de manœuvre ;
- Aménagement du sas de l'écluse : création de bollards flottants, condamnation de la porte intermédiaire, réfection des bajoyers, couronnement béton ;
- Équipements électriques et contrôle-commande ;
- Réfection des terre-pleins ;
- Rénovation de la cabine de commande et des bâtiments ;
- Remplacement des estacades amont et aval ;
- Station de pompage : génie civil, y compris refoulement et rejet, équipements pompage, équipements électriques et contrôle-commande ;
- Aménagement de la berge aval : aménagement des abords de la station et rescindement de la berge rive droite aval.

Il a été considéré pour cette étude les matériaux avec leurs productions et leurs transports, l'utilisation des engins et quand l'information était disponible, leurs transports, le traitement des déchets générés et leurs transports et également la consommation d'électricité du chantier.

2.3 Etape 1 : Les objectifs et le champ de l'étude

La présente étude porte sur les étapes A1 à A5 de la norme NF EN 15804+A1 [10] (Figure 1), à savoir jusqu'à la réception du chantier.

Les flux pris en compte sont :

- Les matériaux utilisés ;
- Le transport des matériaux jusqu'au chantier ;
- Le transport des engins considérés dans les prix généraux ;
- L'utilisation des matériels et des engins ;
- L'électricité consommée sur le chantier ;

- Les déchets générés par le chantier avec leur transport et leur traitement.

Les flux non pris en compte, principalement du fait d'un manque de données sur ces sujets dans le Dossier d'Ouvrage Exécuté (DOE), sont les suivants :

- Le transport des matériels et des engins jusqu'au chantier (sauf ceux considérés dans les prix généraux) ;
- Le transport des personnels ;
- Les installations de chantier ;
- Le report de trafic ;
- Le département administratif.

Ainsi, aucune coupure n'a été réalisée, même s'il a été parfois nécessaire d'écarter des données par manque d'informations. Il pouvait alors s'agir de manque d'information sur

- La géométrie de l'élément permettant de convertir par exemple une longueur en volume ;
- Le matériau constitutif ;
- La provenance ;
- ...

Cette étude a été menée avec le logiciel OpenLCA (v.1.8.0) pour les calculs. Il s'agit d'un logiciel libre, créé en 2006 par GreenDelta. La base de données environnementales qui lui a été associée est la base suisse Ecoinvent (version 3.7 avec comme système d'allocation : cut-off system model). Il s'agit de l'une des bases de données les plus utilisées en Europe. Les processus de la base de données Ecoinvent utilisés dans la présente étude sont cités en italique avec leur nom de base en anglais, afin d'éviter toute confusion.

Les données de l'étude ont été collectées à partir du DOE. Elles s'avèrent donc spécifiques à ce chantier de l'écluse de Don.

2.4 Etape 2 : L'inventaire du Cycle de Vie

L'étude a été réalisée a posteriori, ce qui a nécessité de récolter les données à partir des documents présents dans le DOE. Plusieurs documents ont été utilisés pour collecter les données :

- Sous-détails des prix ;
- Bons de livraison pour les bétons, les remblais, les lisses et les tubes ;
- Bons de suivi des déchets pour les déblais et les déchets amiantés ;
- Demandes d'agrément ;
- Plans techniques ;
- Fichier de suivi du marché avec les quantités facturées ;
- Mémoires d'exécution.

Les quantités principales relatives à ce chantier, issues pour les matériaux des bons de livraison et pour les déchets des bordereaux de suivi des déchets, sont présentées dans le *Tableau 1*.

	Famille	Dénomination	Quantité	Distance aller parcourue par les camions (km)
Données sur les matériaux issues des bons de livraison	Bétons	CEM I 52,5	649 m ³	6 513
		CEM III/A 42,5	1 760 m ³	
	Remblais	Calcaire 0/32	2 840 T	19 720
		Calcaire 0/120	1 961 T	
		Grave ternaïre	1 205 T	
	Aciers	Lisses	251 T	35 416
		Tubes	474 T	5 778
Données sur les déchets issues des bordereaux de suivi des déchets	Ferraille amiantée		354 T	9 355
	Inertes	Déblais	6 854 T	5 963
		Sablon B2	541 T	
		Traitement 0/100	270 T	
		Traitement 0/80	31 T	
		Traitement terre	60 T	
		Traitement concassé recyclé 0-120	124 T	

Tableau 1 – Quantités de matériaux et de déchets, ainsi que leur transport

A chaque donnée issue des travaux, une donnée environnementale issue de la base de données Ecoinvent a dû être affectée, *Tableau 2*.

Catégorie	Donnée à modéliser	Procédé Ecoinvent
Consommation énergétique	Électricité	<i>Market for electricity, medium voltage/FR</i>
	Fioul consommé par les engins	<i>Market for diesel, burned in building machine / GLO</i>
Déchets	Traitement du béton armé démolé et évacué vers un centre de traitement	<i>treatment of waste reinforced concrete, collection for final disposal / Europe without Switzerland</i>
	Traitement de l'acier provenant de garde-corps	<i>treatment of scrap steel, inert material landfill / Europe without Switzerland</i>

	Traitement des déchets amiantés	<i>treatment of hazardous waste, underground deposit / RoW</i>
	Traitement des déblais	<i>treatment of inert waste, inert material landfill / RoW</i>
Transport	Transport avec un camion de 44 tonnes : engins et pièces importantes en taille pour les portes de l'écluse	<i>Transport, freight, lorry >32 metric ton, EURO4, RER</i>
	Transport des matériaux tels que les armatures et le béton, transport des déchets...	<i>Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO4 / RER</i>
Matériau béton	CEM I 52,5 N	<i>concrete 50MPa / RoW</i>
	CEM III/A 42,5 N	<i>Concrete production, 40 MPa, ready-mix, with cement blast furnace slag 35-70% / RoW</i>
	Bordure béton de type CC1, P2, P3	<i>concrete production, for civil engineering, with cement CEM II/B / RoW</i>
Matériau acier	Acier produit en France	<i>steel production, electric, low-alloyed / RER</i>
	Acier provenant des Pays-Bas et du Luxembourg (lisses et tubes)	<i>steel production, low-alloyed, hot rolled / RER</i>
	Armatures	<i>reinforcing steel production / RER</i>
Matériau remblais, granulats, gravillons		<i>gravel production, crushed / RoW</i>
Autres matériaux	Echelle en aluminium	<i>market for aluminium alloy, AlLi / Glo</i>
	Fourreaux	<i>market for polyethylene, high density, granulate / GLO</i>
	Géotextile	<i>polypropylene production, granulate / RER</i>
	Résine EPOBAR	<i>Epoxy resin production, liquid / RER</i>
	Système de protection pour pieux et lisses	<i>Epoxy resin production, liquid / RER</i>
	Anticorrosion IM2ZNI	<i>zinc coating, coils / RER</i>
	Système d'étanchéité (polychloroprène)	<i>market for synthetic rubber / GLO</i>
	Métallisation Zn85Al15	<i>market for zinc / GLO et market for aluminium, primary, liquid / GLO</i>
	Joint hydro gonflant	<i>bentonite quarry operation / RoW</i>

Tableau 2 – Données Ecoinvent affectées aux données de chantier

Dans les noms des procédés Ecoinvent, la zone géographique à laquelle la donnée environnementale se réfère est indiquée à la fin du nom par des lettres dont voici la signification : FR : France - Europe without Switzerland : Europe, hormis la Suisse - RER : Europe - RoW : Reste du monde - GLO : Monde.

2.5 Etape 3 : L'évaluation de l'impact

L'impact environnemental du chantier a été déterminé en suivant la norme NF EN 15804+A1 [10] et en calculant les indicateurs d'impact de cette norme européenne. Ces indicateurs sont calculés par une méthode d'équivalences, dont le principe consiste à convertir les flux des substances susceptibles de contribuer à ces impacts en un flux d'une substance de référence propre à chaque indicateur d'impact.

La nature des travaux de rénovation de l'écluse de Don n'a pas permis de ramener les impacts environnementaux à une unité de référence, comme cela est couramment fait en ACV. Effectivement, habituellement une unité technique est choisie. Dans le cas de la construction d'un ouvrage d'art, les impacts seront ainsi exprimés par exemple par m² de tablier, pour un quai par m² de quai...

De ce fait, les résultats présentés dans cet article correspondent aux impacts environnementaux pour les travaux de rénovation de l'écluse de Don dans leur ensemble.

2.6 Etape 4 : L'interprétation

Afin d'évaluer l'origine de ces impacts, leur répartition selon quatre postes a été regardée, *Figure 2* : les matériaux correspondant à la production des matériaux intervenant dans la rénovation ; les engins correspondant à leur utilisation ; le transport correspondant au transport des matériaux et des engins jusqu'au chantier et les déchets correspondant au traitement des différents déchets générés (déchets amiantés et déblais) et leur transport jusqu'aux centres de traitement.

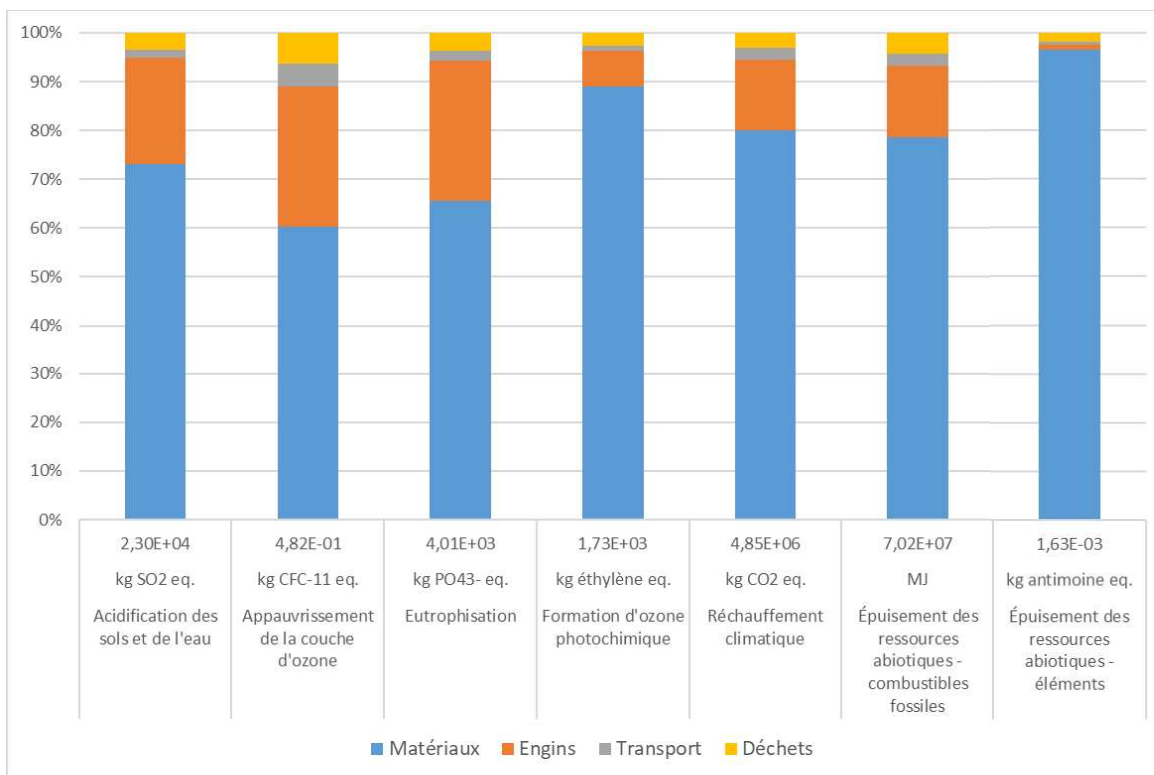


Figure 2 : Impacts du chantier et leur répartition selon les quatre postes

Les résultats mettent en avant que la majorité des impacts environnementaux proviennent des matériaux, et plus particulièrement de la production des matériaux à base d'acier (lisses, tubes et palplanches). Effectivement, quelle que soit la catégorie d'impact, les matériaux représentent plus de 60 % des impacts environnementaux. L'utilisation des engins apparaît en second poste, du fait des moyens importants nécessaires à la mise en fiche et au fonçage de ces éléments. En comparaison, les autres postes sont négligeables.

3. Conclusion et perspectives

Les résultats mettent en avant que la majorité des impacts environnementaux proviennent des matériaux, et plus particulièrement de la production des matériaux à base d'acier (lisses, tubes et palplanches). Aussi, il en ressort que les efforts pour réduire les impacts environnementaux d'un tel chantier doivent porter principalement sur le choix de la solution technique, sous l'angle des matériaux utilisés.

Cette étude comporte des limites. Elle a été menée a posteriori. De ce fait, certaines données s'avèrent imprécises, comme celles relatives à l'utilisation des engins. Par ailleurs, le transport des engins a dû être en partie écarté puisque le dossier d'ouvrage exécuté ne comprenait pas d'informations permettant de déterminer d'où les engins provenaient (quel loueur). Le transport des personnels a aussi dû être écarté. Aussi, les impacts relatifs aux transports sont sous-estimés dans cette étude. Également, la prise en compte de l'usinage n'a pas été considérée. Ainsi, les éléments en acier ont à chaque fois été

considérés bruts, sans mise en forme. Il est probable que pour les portes, cela sous-estime fortement les consommations énergétiques liées à l'acier. Il conviendrait que ce point soit approfondi dans une future étude à dire d'experts ou dans l'idéal en obtenant des données par l'usine (manutentions, oxycoupages, assemblages par soudures, etc.). De plus, il a été cherché à tenir compte au maximum des traitements appliqués sur les matériaux, voir *Tableau 2*, mais sans qu'une exhaustivité ait été obtenue.

Il conviendrait donc que des évaluations environnementales soient menées sur d'autres chantiers fluviaux pour fiabiliser et consolider les données, avec dans l'idéal une récolte des données nécessaires en parallèle de l'avancement du chantier.

Références

- [1] ONU, 2015. Accord de Paris, *Conférences des Nations Unies sur les changements climatiques*, Paris, France, le 12 décembre 2015.
- [2] MEDDE, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie, 2015. Stratégie nationale bas-carbone, publiée en novembre 2015
- [3] MTES, Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire, 2017. Plan Climat, publié le 6 juillet 2017.
- [4] JORF, 2015. Loi n°2105-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. *JORF N°0189* du 18 août 2015.
- [5] JORF, 2017. Décret n°2017-725 du 3 mai 2017 relatif aux principes et modalités du calcul des émissions de gaz à effet de serre des projets publics. *JORF n°0106* du 5 mai 2017.
- [6] JORF, 2021. Loi n°2021-1104 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets. *JORF n°0196* du 24 août 2021.
- [7] Chester, M.V., Horvath, A., 2009. Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, 4(2).
- [8] AFNOR, 2006. NF EN ISO14040:2006 Management environnemental – Analyse du Cycle de Vie – Principe et cadre. *AFNOR Editions*.
- [9] AFNOR, 2006. NF EN ISO14044:2006 Management environnemental - Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices. *AFNOR Editions*.
- [10] AFNOR, 2014. • NF EN 15804 + A1:2014 Contribution des ouvrages de construction au développement durable - Déclarations environnementales sur les produits - Règles régissant les catégories de produits de construction. *AFNOR Editions*.

Auteur principal : VERMEERSCH Perrine – perrine.vermeersch@cerema.fr
Cerema Sud-Ouest, 24 rue Carton, 33200 BORDEAUX, FRANCE

Mots clés/Key words : port, changement climatique, vulnérabilités, adaptation, résilience, Charente-Maritime

Adaptation au changement climatique du Port Atlantique La Rochelle

Résumé de l'article :

L'amélioration de la prévention des risques naturels et de la résilience des réseaux de transport est une action cruciale du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique (PNACC), car ces réseaux sont indispensables au fonctionnement des territoires. Dans le cadre du PNACC, le Cerema a notamment développé une méthodologie d'analyse de risque permettant d'identifier les événements climatiques pouvant impacter un réseau de transport, les vulnérabilités des infrastructures du réseau et de leurs fonctionnalités face à différents événements climatiques et l'évolution de ces vulnérabilités avec le changement climatique.

Cette méthode appelée « Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat » est disponible en ligne à l'adresse : <<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/vulnerabilites-risques-infrastructures-transport-face-au>>. Ce cadre méthodologique demande à être développé et adapté aux ports maritimes et fluviaux.

La méthode s'inscrit dans le cadre plus global d'une démarche d'adaptation au changement climatique, qui comprend également la définition d'une stratégie d'adaptation avec des solutions priorisées. L'objectif de la démarche est d'aider les gestionnaires de réseaux et d'infrastructures à adapter leurs solutions techniques - notamment - aux contraintes climatiques futures et à prioriser les solutions d'adaptation, pour améliorer les politiques et stratégies de gestion et optimiser les dépenses budgétaires. La mise en œuvre de la stratégie d'adaptation participe également au renforcement de la résilience du réseau et du territoire qu'il dessert.

Le Cerema a été sollicité par le Port Atlantique La Rochelle pour les accompagner dans la réalisation d'une analyse des risques encourus par les infrastructures et les fonctionnalités du port et a développé une stratégie d'adaptation à moyen et long terme, en collaboration étroite avec les différents services du port.

L'analyse, menée en lien avec les équipes des différents services du PALR, a permis :

- de mettre en évidence l'évolution de l'exposition du port face au changement climatique à différents horizons ;
- d'identifier des catégories d'infrastructures et de fonctionnalités aux vulnérabilités potentiellement plus fortes à certains aléas climatiques ;
- d'identifier et de prioriser des solutions d'adaptation au regard des résultats précédents.

Un des objectifs recherchés par le Port est d'acquérir une vision globale de la vulnérabilité de leurs infrastructures et fonctionnalités portuaires au changement climatique. Le suivant consiste à élaborer une stratégie d'adaptation avec des propositions d'actions. L'ensemble de ces éléments pourra ainsi être intégré dans un volet spécifique du futur projet stratégique (2025-2030).

Article's abstract :

Improving the prevention of natural risks and the resilience of transport networks is a crucial action in the National Climate Change Adaptation Plan (PNACC), as these networks are essential to the functioning of territories. As part of the PNACC, Cerema has developed a risk analysis methodology to identify the climatic events that can impact a transport network, the vulnerabilities of the network's infrastructures and their functionalities to different climatic events, and how these vulnerabilities evolve with climate change.

This method, entitled "Vulnerabilities and risks: transport infrastructures in the face of climate", is available online at the following address: <<https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/vulnerabilites-risques-infrastructures-transport-face-au>>. This methodological framework needs to be developed and adapted to sea and river ports.

The method is part of a broader approach to adapting to climate change, which also includes defining an adaptation strategy with prioritised solutions. The aim of the approach is to help network and infrastructure managers to adapt their technical solutions - in particular - to future climate constraints and to prioritise adaptation solutions, in order to improve management policies and strategies and optimise budget expenditure. Implementing the adaptation strategy also helps to strengthen the resilience of the network and the area it serves.

Cerema was asked by the Port Atlantique La Rochelle to help them carry out an analysis of the risks to the port's infrastructure and functions, and to develop a medium- and long-term adaptation strategy in close collaboration with the port's various departments.

The analysis, carried out in conjunction with teams from the various PALR departments, made it possible to :

- highlight changes in the port's exposure to climate change over different time horizons;
- Identify categories of infrastructure and functions that are potentially more vulnerable to certain climatic hazards;
- identify and prioritise adaptation solutions in the light of the above results.

One of the Port's objectives is to acquire an overall view of the vulnerability of its port infrastructures and functions to climate change. The next objective is to draw up an adaptation strategy with proposals for action. All of these elements could then be integrated into a specific section of the future strategic project (2025-2030).

Article :

1. Introduction et enjeux

Faire face aux impacts actuels et futurs du climat sur les réseaux de transport est un enjeu majeur du Plan National d'Adaptation au Changement Climatique. Pour répondre à cet enjeu, le Cerema a développé une méthodologie d'analyse de risque des infrastructures et de leurs fonctionnalités. Sa mise en œuvre permet d'obtenir une visualisation des niveaux d'exposition, de vulnérabilité et d'enjeux du réseau. Sur cette base peuvent être définies des stratégies d'adaptation. Cette méthodologie a été appliquée par le Cerema sur le domaine portuaire du Port Atlantique La Rochelle, à sa demande pour anticiper le changement climatique dans ses stratégies de gestion et identifier des solutions d'adaptation.

2. Méthodologie de l'analyse de risque du port face au changement climatique

La méthodologie mise en place sur le port de La Rochelle débute par la définition du périmètre de l'étude en fonction de ses propres objectifs : contexte géographique, infrastructures et fonctionnalités, événements climatiques à étudier. Elle est suivie de l'analyse de l'exposition actuelle du port à différents événements climatiques et de l'évolution de celle-ci, des impacts potentiels de ces évolutions climatiques sur les infrastructures et leurs fonctionnalités, des risques, suite au croisement entre l'analyse de l'exposition et l'analyse des vulnérabilités. Des éléments d'orientation stratégique pour améliorer la résilience du réseau face à ces évolutions climatiques sont enfin proposés.

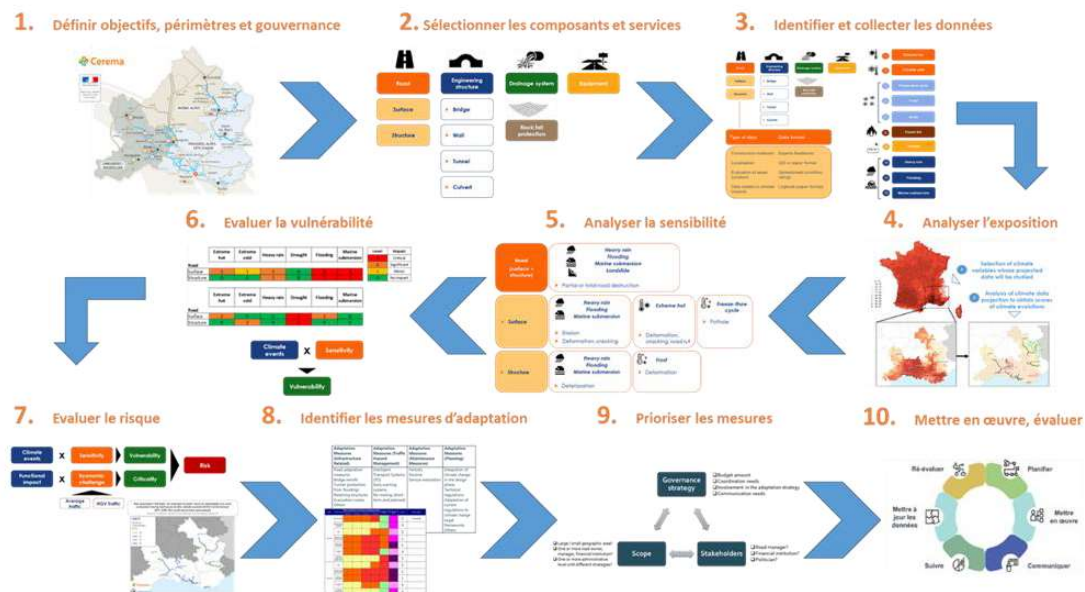


Figure 1 : Méthodologie pour l'adaptation des infrastructures au changement climatique (Cerema)

2.1 Définition du périmètre de l'étude

Le port Atlantique de La Rochelle possède plusieurs types d'infrastructures qui assurent des services variés dans un périmètre foncier restreint. Il a été choisi d'étudier les vulnérabilités de l'ensemble du domaine portuaire, c'est-à-dire toutes les infrastructures existantes (depuis l'ensemble des ouvrages maritimes aux infrastructures terrestres en passant par les différents types de bâtiments et les réseaux) et toutes les fonctionnalités spécialisées, telles que la navigation maritime, le traitement de l'eau, le transport d'hydrocarbures, le stockage de vrac, de conteneurs, etc. Le découpage a été effectué en ne prenant en compte que les éléments dont le port à la gestion et de niveau stratégique et opérationnel suffisant. De même, pour répondre aux objectifs du port, tous les types d'événements climatiques pertinents pour l'aire d'étude ont été retenus.

2.2 Analyse et notation des évolutions de l'exposition du port à horizon proche et lointain

Neuf familles d'événements climatiques ont été prises en compte : températures élevées et basses, pluies intenses, inondations, hausse du niveau marin etc. Leurs évolutions sur l'aire d'étude ont été analysées pour une période de référence (trente dernières années) et deux périodes projetées, à horizon proche (2050) et lointain (2100), permettant de prendre la mesure des changements et impacts sur le port à court et long terme en comparaison d'un scénario passé, dit de référence. Croisés à ces temporalités, deux scénarios de changement climatique, basés sur les niveaux de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (scénarios du GIEC), ont été choisis. Les scénarios RCP permettent de modéliser le climat sur la base d'hypothèses différentes concernant la quantité de gaz à effet de serre qui sera émise dans le futur. Chaque scénario RCP donne une variante jugée probable du climat qui résulte du niveau d'émission choisi comme hypothèse de travail et est nommé d'après la gamme de forçage radiatif émis en 2100. Pour le port, deux scénarios sont étudiés : RCP 4.5 (scénario dit « médian » avec la mise en place de politiques de réduction des émissions de GES) et RCP 8.5 dit « pessimiste » (scénario sans politique d'atténuation, correspondant à une trajectoire +4°C).

Le constat révèle une exposition actuelle multiple pour le port de La Rochelle. La projection des évolutions de l'exposition est particulièrement marquée par une augmentation des températures, la hausse du niveau marin et l'augmentation des risques d'inondation par submersion marine.

2.3 Analyse de risque des infrastructures et fonctionnalités aux aléas climatiques

2.3.1 Analyse de la sensibilité physique et fonctionnelle

Le Cerema a réalisé l'analyse de sensibilité, qui correspond à la description des impacts possibles d'un aléa climatique sur une infrastructure ou une fonctionnalité. Ce travail a consisté d'abord à identifier des familles d'infrastructures et fonctionnalités portuaires de la manière la plus exhaustive qui soit. Ont ainsi pu être identifiées 29 familles d'infrastructures (ouvrages avec enrochement, en maçonnerie, voiries,

bâtiments...) et 22 familles de fonctionnalités (accueil des navires, stockage sous abri, mise à disposition de foncier naturel...). Puis, en collaboration étroite avec les différents services du port, les impacts des événements climatiques ont été décrits pour chaque famille d'infrastructures et de fonctionnalités, à dire d'experts et sur la base d'une analyse bibliographique. Ces sensibilités ont enfin été notées selon deux échelles différentes, l'une liée aux impacts sur les infrastructures, l'autre liée aux perturbations des fonctionnalités.

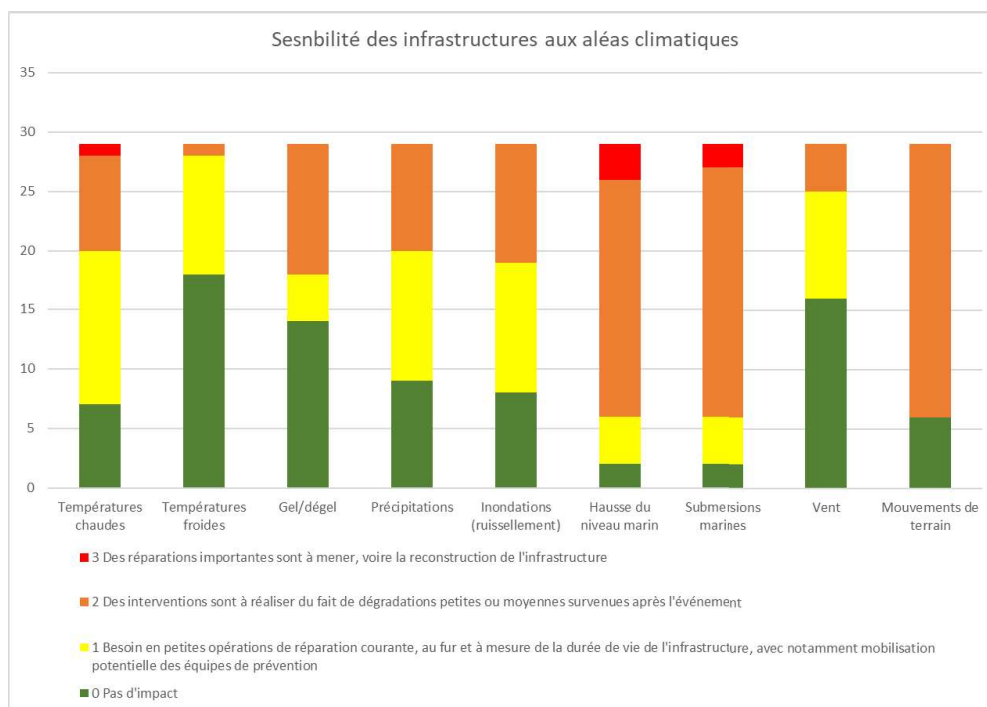


Figure 2 : Représentation de la sensibilité actuelle des infrastructures du Port de La Rochelle à différents aléas climatiques (Cerema 2023)

2.3.2 Détermination de la vulnérabilité du port au changement climatique

Le croisement de la note d'évolution d'un événement climatique avec la note de vulnérabilité donne un niveau de vulnérabilité qui traduit donc une évolution potentielle des sensibilités avec le changement climatique. Ce calcul a été répété pour chaque fonctionnalité, chaque infrastructure, chaque événement climatique retenu et enfin chaque scénario et horizon retenu. Le résultat prend la forme d'une matrice de risque. Certaines infrastructures et fonctionnalités aujourd'hui peu vulnérables peuvent voir leur vulnérabilité augmenter avec le changement climatique, ou inversement.

3. De l'analyse de risque à la stratégie d'adaptation

3.1.1 Un port vulnérable aux conditions climatiques futures

La méthodologie appliquée au port de La Rochelle a permis de mettre en exergue différentes familles d'infrastructures et de fonctionnalités qui seront soumises à un risque plus important de détérioration et/ou de destruction (pour les infrastructures) et de dégradation, voire d'arrêt (pour les fonctionnalités).

L'une des vulnérabilités qui évolue le plus et pour laquelle un grand nombre de familles d'infrastructures et fonctionnalités est en vulnérabilité très forte porte sur le risque submersion. Cette forte vulnérabilité est liée d'une part à une importante hausse de l'exposition future aux submersions marines et d'autre part à une sensibilité élevée de nombreux composants face à ce risque. Des submersions plus fréquentes et plus intenses auront des conséquences sur la dégradation prématurée de la plupart des composants. Également, avec le changement climatique, une hausse probable du niveau permanent de la mer sera visible au niveau du port. Même s'il existe des incertitudes sur les hauteurs réellement atteintes, cette évolution du niveau marin engendrera des impacts forts pour les ouvrages maritimes et les terre-pleins et l'ensemble des fonctionnalités de sécurité, de transport ou encore de stockage qui leur sont liés. Enfin, la hausse des températures est une variable climatique certaine, dont on mesure déjà les effets. Cette hausse va impacter plusieurs familles d'infrastructures (mais reste marginal pour les fonctionnalités). Notamment les températures extrêmes peuvent provoquer des dilatations, des déformations et des fissures des bétons (ouvrages maritimes en béton armé, voiries, dalle béton des terre-pleins...). Pour le métal, les fortes chaleurs engendrent des dilatations pouvant ainsi affecter les voies ferrées et rail de grues. Ainsi certains ouvrages d'art, constitués de ces deux types de matériaux peuvent également se dégrader. Enfin, de fortes chaleurs extérieures peuvent faire augmenter la température à l'intérieur des postes de transformation avec des risques d'endommagement.

3.1.2 Comprendre pour pouvoir anticiper

En raison du nombre important d'infrastructures et de fonctionnalités à étudier, un choix a dû être fait pour l'étude des solutions d'adaptation. En concertation avec le PALR, celles-ci ont été identifiées en fonction des critères suivants :

- De la vulnérabilité des infrastructures et des fonctionnalités : seules les infrastructures et les fonctionnalités présentant une vulnérabilité importante ont été considérées.
- Du scénario RCP à étudier : le PARL a souhaité approfondir l'étude avec un scénario RCP 8.5, le plus pessimiste parmi ceux proposés par le GIEC (correspondant à un forçage radiatif de 8.5 W/m²).
- De la fiabilité des projections climatiques : seules les projections climatiques ayant une fiabilité considérée comme « forte » ont été considérées. En effet, plusieurs projections de variables climatiques sont assorties d'incertitudes plus ou moins importantes ; la hausse du niveau marin et des submersions

marines plus extrêmes et/ou fréquentes sont certaines, même si les zones concernées et les hauteurs atteintes ne sont pas encore bien connues. Ces risques sont donc indéniablement à prendre en compte dans les aménagements futurs et les politiques de relocalisation ou confortation des infrastructures existantes. A contrario, même si les mouvements de terrain sont sources de dégradations importantes, les incertitudes quant à leur survenue et localisation incitent à une surveillance accrue essentiellement..

En parallèle, le Port de La Rochelle a procédé à une modélisation des principales vulnérabilités à court et long terme via son SIG. Ces cartographies permettent d'ajouter une synthèse graphique aux différentes matrices de notations et d'ajuster certaines notes pour être plus en cohérence avec la réalité du site.

3.1.3 A la recherche de solutions d'adaptation au changement climatiques opérationnelles et résilientes

Un panel de solutions a été proposé et classé par catégories : adaptation des infrastructures neuves ou existantes ; mesures d'adaptation à intégrer à la politique de gestion et d'entretien et mesures d'évolution de l'exploitation, y compris en gestion de crise pour les fonctionnalités vulnérables.

Des mesures plus transversales, notamment liées à la gouvernance, la sensibilisation des acteurs internes et externes, l'amélioration de la connaissance des risques et vulnérabilités, la recherche de solutions techniques innovantes sont également proposées.

Les solutions peuvent revêtir un caractère de mise en œuvre à court (politique d'adaptation immédiate du port à son environnement intégrées au projet stratégique) et long terme (influencer dès aujourd'hui les politiques de demain).

Les principales mesures ont été synthétisées sous la forme de fiches d'adaptation par variable climatique. Ainsi, ces mesures concernent 4 aléas climatiques : l'augmentation des températures, la hausse permanente du niveau marin, l'aggravation de submersions marines, et des pluies extrêmes.



Figure 3 : Exemple de fiches d'adaptation (Cerema 2023)

Ces fiches permettent de définir un cadre stratégique. L'objectif est ainsi de fournir au port un ensemble de possibles en leur laissant établir et mettre en œuvre leur plan d'actions en fonction de critères choisis par leurs instances décisionnaires.

En effet, il est difficile de prioriser les solutions car toutes apportent des réponses techniques, organisationnelles ou de sensibilisation à différents aléas et différents types de dégradation ou dysfonctionnement. Et c'est bien la succession de mises en œuvre d'actions, de plus ou moins grande envergure, qui permet de s'adapter à un monde qui change.

Cependant, il a été proposé au port de réfléchir à différents moyens de priorisation. Ainsi, deux méthodes sont étudiées. Une première, classique, basée sur une analyse multi-critères prenant notamment en compte la faisabilité financière et technique des mesures. La deuxième, plus innovante, se base sur la résilience. S'appuyant sur une méthode et un outil, élaborés par le Cerema, il s'agit de tester la résilience des solutions d'adaptation.



Figure 4 : Exemple de test d'une solution d'adaptation au regard de la résilience (Cerema 2023)

4. Conclusion et perspectives

Cette étude basée sur la méthode CEREMA d'évaluation de la résilience des infrastructures au changement climatique a permis de mettre en évidence la résilience de certaines infrastructures et fonctionnalités du Port de La Rochelle face à différents aléas climatiques évalués. A titre d'exemple, le dimensionnement haut des quais permettent de se préparer déjà à une hausse probable du niveau marin, notamment à moyen terme. Mais, l'étude a aussi mis en exergue plusieurs points de vulnérabilité du port impactant physiquement certains composants comme les ouvrages maritimes et les terre-pleins face aux submersions et aux fortes chaleurs. Support de nombreuses activités (transport terrestre, travaux, gestion de marchandises...), les défaillances de ces infrastructures impacteraient en conséquence de nombreuses fonctionnalités. Ces exemples sont cités à titre illustratif et l'étude complète détaille l'ensemble des vulnérabilités identifiées. Enfin des solutions d'adaptation ont été recherchées sur plusieurs thématiques : travaux sur les ouvrages existants, nouvelle façon de concevoir des ouvrages neufs, modification des politiques d'entretien, mise en place de mesures de gestion de crise ou encore plan de sensibilisation et de communication en interne et en externe. Plusieurs actions pour répondre à plusieurs aléas, à plusieurs échéances, mais qui permettront dans la durée de faire face efficacement à des perturbations de plus en plus fortes dues au changement climatique.

Références

Cerema (2019) - Vulnérabilités et risques : les infrastructures de transport face au climat - <https://www.cerema.fr/fr/actualites/changement-climatique-gerer-infrastructures-resilientes>

Auteur principal : Rita Pombo (ritanovo@ua.pt) – RISCO & Department of Civil Engineering, University of Aveiro, Portugal

Co-auteurs : Carlos Coelho (ccoelho@ua.pt) – RISCO & Department of Civil Engineering, University of Aveiro, Portugal; & Hugo Lopes (hugo.lopes@apdl.pt) – Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, S.A., Portugal

Keywords : Future-proof solutions, Competitiveness framework, PESTLE analysis, SWOT analysis

Container ports’ planning – key factors to boost resilience

Résumé de l'article : L'élaboration de stratégies de résilience pour les ports repose en grande partie sur une large compréhension des facteurs qui influencent le commerce maritime international. Cette connaissance revêt une importance particulière en raison de l'évolution constante et profonde de plusieurs industries et secteurs. Dans le but de contribuer à la caractérisation du macro-environnement entourant les activités des ports à conteneurs, une étude intégrative des différents facteurs impliqués a été menée. La méthodologie proposée comprend une analyse PESTLE qui examine les domaines politique, économique, social, technologique, juridique et environnemental. Cette évaluation décrit les facteurs externes affectant les activités des ports à conteneurs, y compris les opportunités et les menaces. Ensuite, les résultats ont été intégrés dans une analyse SWOT complémentaire qui a permis de délimiter les facteurs internes des ports à conteneurs, y compris les faiblesses et les forces. Enfin, une matrice TOWS a été élaborée pour aider à définir des stratégies de résilience, sur la base des observations précédentes. En conclusion, ce travail fournit un cadre actualisé de l'environnement commercial des ports à la lumière de la situation actuelle du marché mondial du transport maritime par conteneurs et des tendances mondiales récentes.

Article's abstract : The creation of resilience strategies for ports is heavily reliant on a broad understanding of the factors that influence international maritime trade. This awareness holds particular significance due to the constant and far-reaching evolution of several industries and sectors. With the aim of contributing to the characterization of the macro environment revolving around the container ports' business, an integrative investigation of the various factors involved was conducted. The proposed methodology comprises a PESTLE analysis that investigates the political, economic, social, technological, legal and environmental domains. This assessment describes the external factors affecting the container ports' business, including opportunities and threats. Secondly, the results were integrated into a complementary SWOT analysis that helped delineate the container ports' internal factors, including weaknesses and strengths. Ultimately, it was developed a TOWS matrix that helped delineate resilience strategies, based on the previous insights. In conclusion, this work provides a holistic competitiveness framework in light of the current status of the container shipping business and recent worldwide trends.

1. Introduction and aims

Ports are critical infrastructures that help maintain the normalcy in the daily lives of citizens. Their incapacitation or destruction can have a debilitating effect on national security, the economy, public health, safety, or any combination thereof [1]. The blockage of the Suez Canal, the COVID-19 pandemic, and Russia's invasion of Ukraine are examples of unexpected events, triggered by different causes, but all with global consequences testifying to the importance of ports having the ability to withstand changing conditions and recover from shocks. In particular, downtime in container ports due to unexpected disturbances can cost lives as people wait for essential food or medical supplies. In an increasingly uncertain outlook, a thorough understanding of the current factors affecting the container ports' business continuity and the strategies available to address them is vital.

After conducting a literature review, it can be concluded that a PESTLE analysis is an effective tool for developing a holistic view of the external forces (O - opportunities, and T - threats) influencing a certain business. As the acronym suggests, this analysis involves examining external factors in the political, economic, social, technological, legal, and environmental domains. In turn, the SWOT analysis is concluded to be of help in complementing the former by delivering insights about internal factors (S - strengths, and W - weaknesses) as well. These forms of analysis have already been implemented in similar studies, namely, [2] used both to analyse port sustainability in the Spanish Port System, [3] used PESTLE to detect threats to the normal functioning of harbour facilities, [4] used PESTLE to study maritime piracy and maritime security in the Gulf of Guinea, and [5] used both to identify the main opportunities and challenges from the implementation of a port energy management system. Nevertheless, their application is still scarce in what concerns the analysis of ports' business environment and is usually focused on specific, isolated problems. The study also brings an innovative aspect by developing a TOWS matrix on the proposed topic (considering the method presented by [6]). This matrix is grounded on the SWOT analysis and can be understood as a strategic planning tool since it provides strategic actions paired according to the elements SO, ST, WO and WT. Hence, it helps craft actionable strategies based on the insights from the SWOT.

Accordingly, the methodology followed in this paper is divided into three steps. First, a PESTLE analysis is carried out to outline opportunities and threats, second, a complementary SWOT is conducted to identify weaknesses and strengths, third, a TOWS matrix is delineated to formulate strategic actions aimed at enhancing container ports' resilience. The results of this study are considered useful, not only for the update on the container ports' business environment but also for its potential to help anticipate future scenarios and prepare resilience plans. Also, it is based on an innovative approach by bringing together key drivers and cross-referencing strengths and weaknesses with opportunities and threats into a single action framework.

2. Article

2.1 PESTLE analysis

The PESTLE analysis is methodically divided into its six main domains, as following described, and examines the external macro-environment that impacts container ports. This analysis is based on the study presented by [7].

2.1.1 Political drivers

The commercial policy practised in each country, through its way of managing the economic interactions with other countries, has a significant impact on the development of maritime trade. For instance, free trade agreements and economic partnership agreements define the degree of accessibility and facilitation of import and export operations and can deliberately influence the decisions of maritime transport companies and the agents involved in the shipment and receipt of cargo. Likewise, customs regulations that define clearance procedures, necessary documentation, and inspection requirements also interfere with the efficiency and costs of maritime trade. Indeed, changes to customs regulations and excessive bureaucracy can result in delays and loss of trade partners, as illustrated by the Brexit process. Geopolitical rivalries that involve the imposition of economic sanctions on certain countries or regions, also affect business development. As verified during the military conflict caused by the Russian invasion of Ukraine, disruptions resulting from the blockade of maritime navigation and port operations prompted the quest for alternative routes and the search for new partners to supply the detained goods. Political stability is therefore an essential factor for ensuring confidence, predictability, and security in the relations between countries and their business partners. Adding to the challenges of operating internationally, extreme protectionist measures based on continued economic constraints, tightened regulation and administrative barriers mean that some cross-border businesses might become more challenging. Policies favouring national production against foreign competition reduce the need for maritime transportation, with potential consequences that could alter global trade patterns. Nonetheless, government support and the availability of public incentives for the implementation of new projects and businesses (including the provision of tax incentives, the promotion of favourable international trade policies, and proactive involvement in international organisations) can produce the opposite effect.

2.1.2 Economic drivers

Global economic growth is a clear catalyst for the advancement of containerized cargo shipping. When it increases, it signals the potential for more consumption, production, and transactions, which explicitly boost the transportation of cargo by sea. On the other hand, it is landside investments in port infrastructure, logistics and industrial areas, and accessibilities to intermodal transport that determine the level of service that can be offered and the ability to attract and retain customers. Investing in fleet modernisation and implementing strategies of economies of scale (by increasing the size of the ships in operation and therefore the capacity of cargo transported) are parallel factors driving operational efficiency, reduction of costs, and enhancement of the competitiveness and sustainability of the sector. Nevertheless, the economic margins of this business are ultimately established by the balance between the supply and demand of consumer goods. Interest rates are another major factor influencing the investment and financing decisions of the companies in the sector. Decisions relating to the modernisation and expansion of the maritime fleet and the development of supporting infrastructure depend on accessibility to loans and financing solutions. Currency fluctuations can also impact the cost of traded goods and pose financial risks, making it crucial to choose the right time and partners

for contracts based on their currencies' strength or weakness. Finally, freight rates, depending on fleet capacity, operational costs (e.g., fuel, crew, maintenance, and port fees), global economic atmosphere, competition environment, distances and travel times, and naturally depending on the law of supply and demand, are also one of the leading economic drivers.

2.1.3 Social drivers

Lifestyles, social behaviour and cultural trends are reflected in consumer habits which ultimately influence the need for cargo movement. Particularly, the demand for imported products, facilitated by online shopping, influences containerized maritime shipping in terms of volumes and origin and destination nodes. This is even fostered by the continuous growth of the world population. Another point is that awareness of environmental issues has encouraged sustainable consumption practices, including selecting products based on how they are being produced (i.e. processes and materials used), their place of origin (with preference for local products when price is not an obstacle), and options for disposal (with priority for those that can be reused or recycled). The widespread adoption of technological means, combined with the development of e-commerce, also impacts consumption patterns in a way that it privileges fast and smooth services that have the possibility of parcel tracking and prediction of the delivery moment. In terms of population, migration movements are one of the factors that influence the demand for new goods in different regions. The rise of the average life expectancy dictates consumption trends related to the need for access to pharmaceutical products and healthcare equipment, as well as requirements for convenience and quality. In addition to these, cultural norms and local preferences also affect the demand for consumer goods and products. Finally, apart from living conditions, also working conditions can have a relevant impact. Maritimes dissatisfaction echoes in labour disruption through protests and strikes, with consequences for maritime transport operations.

2.1.4 Technological drivers

Technology plays a crucial role in efficiency, safety, and sustainability. Technological advancements have enabled the creation of new business models and more efficient, optimized, and personalized solutions. These advancements have allowed for preventive maintenance actions through intelligent sensors and monitoring equipment applicable to ships and land-based equipment, preventing failures. Technologies such as RFID and IoT enable precise tracking of cargo location and status in real-time, process transparency, and reduction of theft and loss risks. In addition to X-rays, other advanced imaging technologies already allow for the creation of three-dimensional images of container interiors and contents, detecting risky situations. Digitisation and automation of processes such as document issuance, invoicing, and financial transactions have alleviated bureaucracy and reduced the occurrence of errors. Additionally, automation of port terminals has allowed for increased performance of container handling equipment and vehicles. The symbiosis between radar sensor systems, satellite navigation, automation, artificial intelligence, drones, cameras, and advanced sensing technologies has enabled the first autonomous container ships to navigate without crew on board the vessel. Virtual and augmented reality technologies have been used for crew and port operators' training. Technologies related to data analysis and prediction models allow for more informed decision-making, solving problems related to route definition and resource allocation. It is also currently possible to monitor and coordinate multiple operations along the extensive logistical chains that run from the producer to the

end consumer. At an environmental level, technology has been crucial in developing more sustainable solutions with the aim of reducing pollutant emissions and environmental impacts. Collaboration between business partners has been facilitated by the digitisation and integration of data from multiple sources and by streamlining processes. E-commerce has revolutionised consumption patterns and respective logistical requirements. And, in recent years, the advancement of blockchain technology has facilitated product tracking, fraud and forgery prevention, payment processes, supply chain management, creation of decentralised market platforms and the protection of data.

2.1.5 Legal drivers

The legal framework is the means to establish the structure, including the bases and limits, of the business activity. It provides the laws, regulations, standards, and guidelines that ensure the order, justice, and safety of the sector. It can cover diverse aspects such as the rights and responsibilities of the involved parties, safety requirements, environmental protection regulations, intellectual property rights, contract negotiation rules, surveillance, and penalties for non-compliance. International standards for safety, pollution prevention, living conditions, and onboard working conditions are prominent in the maritime transportation sector. There are also international codes to cover aspects related to the protection of maritime transport against terrorist threats, collisions at sea, maritime search and rescue procedures, container security, facilitation of maritime traffic, ship tonnage, and illicit acts. In addition to the environmental and customs regulations, it is worth highlighting antitrust law, designed to promote fair competition and ensure that markets remain open, competitive, and efficient, leading to benefits for consumers, businesses, and the economy as a whole. And consumer protection law that helps ensure that consumers are treated fairly, informed accurately, and protected from deceptive or unfair practices in the market. There are also commercial and contractual laws governing freight contracts to protect the interests of all parties, including shippers, carriers, recipients, and insurers. In addition, international regulations, such as those of the United Nations Security Council, may restrict the maritime transport of certain cargoes, or between specific countries, if they pose a threat to international security. Similarly, there are intellectual property restrictions that safeguard the rights of creators or trademark owners, which prevents the illegal trade of counterfeit or copyrighted products and infringements of existing patents. Finally, as in other industries, there are also regulations concerning health, safety, and labour rights to ensure safe and fair working conditions.

2.1.6 Environmental drivers

Concerns regarding climate change, air and water pollution, and other negative impacts on the environment resulting from anthropogenic factors have been the primary drivers of environmental policy development. Various regulations have been established, including requirements for energy efficiency, the use of alternative fuels, pollution monitoring systems, pollution monitoring technologies, waste management, ballast water management, prevention of hazardous materials spills, biodiversity protection, and implementation of sustainable practices. In addition to ship requirements, there are also landside restrictions related to the construction and expansion of coastal infrastructures in order to prevent disturbance in the surrounding ecosystems. However, regulatory disparities, as illustrated by the policies set forth by the International Maritime Organization and the European Union, promote uncertainty and inequality and underscore the challenge of creating consistent global standards. These compliance challenges, which have yet to be resolved, increase the operational

complexity of the sector, encourage the development of regional markets where more favourable regulations are in force, complicate negotiations and cooperative actions, and thus affect the competitiveness balance. Nonetheless, there are global initiatives that bring together companies, governments, and non-governmental organisations with the common goal of decarbonising the maritime sector as soon as possible. Despite positive actions, war and armed conflicts have hindered the energy transition and compliance with environmental regulations due to the impact on accessing energy resources such as natural gas (used as an alternative fuel) and essential minerals for producing renewable energy technologies. In particular, for countries in conflict, resource prioritisation is focused on security needs and restoration of affected infrastructure, turning sustainability cooperation efforts as secondary. Also, ports located in areas prone to natural disasters like hurricanes, earthquakes, or tsunamis face increased vulnerability.

2.2 SWOT analysis

The outcomes of the SWOT are presented in Table 1. This table encapsulates external and internal factors affecting container ports, considering that “strengths” are positive attributes or advantages, “weaknesses” are areas where it encounters difficulties or challenges, “opportunities” relate to pathways for growth or enhancement and “threats” relate to potential hurdles or risks.

Table 1 : SWOT analysis.

	Strengths	Weaknesses	Opportunities	Threats
Political	(s1) Attractiveness to government (s2) Strong political relationships	(w1) Lack of political advocacy and lobbying (w2) Sensitivity to political stability	(o1) Government support and incentives (o2) International trade agreements	(t1) Unfavourable commercial policies (t2) Disruptions from political instability
Economic	(s3) Agile financial strategies (s4) Stakeholder confidence	(w3) Infrastructure limitations (w4) Competitive pricing pressure	(o3) Global trade growth (o4) Capital infusion	(t3) Financial market fluctuations (t4) Economic downturns
Social	(s5) Highly skilled workforce (s6) Community engagement	(w5) Labour strikes and disputes (w6) Community environmental concerns	(o5) Workforce development and just transition measures (o6) CSR initiatives	(t5) Emergence of niche markets (t6) Supply and demand fluctuations
Technological	(s7) Advanced technology and infrastructure (s8) Innovation culture	(w7) Lack of technological expertise (w8) Outdated IT infrastructure and systems	(o7) Creation of smart facilities (o8) Technological skills development and training	(t7) Rapid technological obsolescence (t8) Cybersecurity risks
Legal	(s9) Commitment to legal and regulatory compliance (s10) Contractual expertise and risk management skills	(w9) Legal compliance costs and complexity (w10) Antitrust and competition challenges	(o9) Ethical business practices (o10) Data privacy compliance	(t9) Legal disputes and litigation processes (t10) Changing legal landscapes
Environmental	(s11) Energy efficiency and sustainable practices (s12) Cooperative initiatives	(w11) Sustainability implementation challenges (w12) Climate change vulnerability	(o11) Global decarbonization goals (o12) Renewable energy integration	(t11) Environmental compliance challenges (t12) Critical resource shortages

2.3 Strategic framework

Table 2 presents the TOWS matrix, providing 5 strategic actions for each pair of drivers. Namely, SO strategies - aim to leverage internal strengths to capitalize on external opportunities, WO - focus on mitigating internal weaknesses by taking advantage of external opportunities, ST - aim to utilize internal strengths to counteract external threats, and WT – focus on improving internal weaknesses to minimize the impact of external threats. As can be observed, all the 48 drivers identified in the SWOT analysis were cross-referenced to formulate 20 strategic actions, with some strategies addressing multiple factors simultaneously, which builds a more effective, holistic, approach.

Table 2 : TOWS matrix.

<p><u>SO strategies:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Incorporate energy-efficient and sustainable practices (s11) to align with global decarbonization goals (o11) and enable renewable energy integration (o12) 2) Harness the power of strong political relationships (s2) and attractiveness to government (s1) to take advantage of government support and incentives (o1) 3) Leverage community engagement (s6) and a highly skilled workforce (s5) to enhance CSR initiatives (o6) 4) Utilize commitment to legal and regulatory compliance (s9) along with contractual expertise and risk management skills (s10) to ensure ethical business practices (o9) and data privacy compliance (o10) 5) Enhance agile financial strategies (s3) and stakeholder confidence (s4) to attract capital infusion (o4) 	<p><u>WO strategies:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Reduce legal compliance costs and complexity (w9) through the utilization of government support and incentives (o1) 2) Address the lack of technological expertise (w7) by investing in technological skills development and training (o8) 3) Address infrastructure limitations (w3) by investing in the creation of smart facilities (o7) and take advantage of global trade growth (o3) 4) Mitigate labour strikes and disputes (w5) by supporting workforce development and just transition measures (o5) and CSR initiatives (o6) 5) Counteract sensitivity to political stability (w2) by capitalizing on international trade agreements (o2)
<p><u>ST strategies:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Employ agile financial strategies (s3) to steer through financial market fluctuations (t3), economic downturns (t4) and unfavourable commercial policies (t1) 2) Engage in cooperative initiatives (s12) to address critical resource shortages (t12) and adapt to the emergence of niche markets (t5) 3) Leverage commitment to legal and regulatory compliance (s9) to address environmental compliance challenges (t11) 4) Invest in contractual expertise and risk management skills (s10) to mitigate potential legal disputes and litigation processes (t9) and monitor changing legal landscapes (t10) 5) Leverage advanced technology and infrastructure (s7) and innovation culture (s8) to counteract rapid technological obsolescence (t7) and cybersecurity risks (t8) 	<p><u>WT strategies:</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Address the lack of political advocacy and lobbying (w1) to navigate changing legal landscapes (t10) and manage disruptions from political instability (t2) 2) Upgrade outdated IT infrastructure and systems (w8) to steer through supply and demand fluctuations (t6) 3) Mitigate community environmental concerns (w6), address sustainability implementation challenges (w11), and tackle climate change vulnerability (w12) to prevent environmental compliance challenges (t11) 4) Proactively manage antitrust and competition challenges (w10) to reduce the likelihood of legal disputes and litigation processes (t9) 5) Mitigate the impact of competitive pricing pressure (w4) to navigate supply and demand fluctuations (t6)

3. Conclusion and perspectives

This paper offers an updated analysis of external forces shaping the container ports' business, describing a range of factors involved in six main domains, according to the PESTLE analysis. It also presents a well-rounded assessment of strengths, weaknesses, opportunities and threats, according to

the SWOT analysis. Finally, based on the TOWS matrix developed, it delivers a holistic action framework by providing competitiveness strategies grounded on a cross-reference study that pairs strengths and weaknesses with opportunities and threats.

The findings presented serve as a starting point for devising resilience strategies for container ports in order to meet current market demands. Overall, there is an endless diversity of external factors that can drive the container ports' business into new ways of operation. In correspondence, there is a wide list of actions that could be taken to address those drivers. Nevertheless, this analysis can be further extended through a scalable application of the method for a deeper development of the framework.

4. Acknowledgements

Rita Pombo was supported by the doctoral Grant SFRH/BD/151357/2021, financed by the Portuguese Foundation for Science and Technology (FCT), and with funds from the Portuguese state budget, under MIT Portugal Program.

5. Bibliographic references

- [1] He, Y., Yang, Y., Wang, M., & Zhang, X. (2022). Resilience Analysis of Container Port Shipping Network Structure: The Case of China. *Sustainability*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159489>
- [2] Sánchez-Cambronero, A., González-Cancelas, N., & Serrano, B. M. (2020). Analysis of port sustainability using the PPSC methodology (PESTEL, Porter, SWOT, CAME). *World Scientific News*, 146(June), 121–138. Available from: www.worldscientificnews.com
- [3] Gechkova, T., & Kaleeva, T. (2021). Harbour Infrastructure Protection – Pestle Analysis Knowledge – International Journal. 49, 961–967.
- [4] Ofosu-Boateng, N., & Jiping, Z. (2020). A Pestle Analysis of Maritime Piracy and Maritime Security in the Gulf of Guinea. *Advances in Social Sciences Research Journal*, 7(1), 472–482. <https://doi.org/10.14738/assrj.71.7742>
- [5] Christodoulou, A., & Cullinane, K. (2019). Identifying the main opportunities and challenges from the implementation of a port energy management system: A SWOT/PESTLE analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/su11216046>
- [6] Sarsby, A. (2016). SWOT analysis. Lulu. com. Available from: https://books.google.pt/books?id=Yrp3DQAAQBAJ&pg=PA7&hl=pt-PT&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false
- [7] Pombo, R., Coelho, C., & Lopes, H. (2023). Gestão Portuária – Uma Análise Macro-Ambiental dos Fatores que Influenciam o Tráfego Marítimo de Carga Contentorizada. 11as Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária, Leixões, Portugal. [in press]

Auteur principal: LEMAIRE Alexandre - ESID de Brest - alexandre.lemaire@intradef.gouv.fr - Brest (29) - France

Co-auteurs : BLANC Laurent - ESID de Brest - laurent-f.blanc@intradef.gouv.fr - Brest (29) - France;
BOUTIN Roland - ESID de Brest - roland.boutin@intradef.gouv.fr - Brest (29) - France

Mots clés: Service d'infrastructure de la Défense – Marine Nationale – Brest – modernisation - adaptation – changement climatique – ouvrages maritimes

Adaptation et modernisation du port militaire de Brest face à l'arrivée des nouveaux navires de la Marine Nationale

Résumé de l'article : En 1631, le cardinal de Richelieu créait l'arsenal de Brest. Depuis le port militaire n'a cessé de s'adapter à l'évolution des technologies navales, faisant de l'arsenal une composante de chaque système d'arme de la Marine. Les années 2020 à 2030 voient l'arrivée d'une nouvelle génération de bâtiments de surface, de plus fort tonnage, avec des équipages plus restreints et des servitudes plus exigeantes, alors que les structures des années 50, quais et infrastructures portuaires, sont vieillissantes. Le port militaire de Brest connaît ainsi une nouvelle mutation au travers d'un schéma directeur ambitieux combinant travaux, maintenance et activité opérationnelle tout en répondant également aux enjeux environnementaux et climatiques.

Ainsi, afin d'accueillir les nouveaux navires de la Marine, deux pontons flottants à deux niveaux de 160 mètres de long, perpendiculaires aux quais, ont été installés dans le port. Le pont inférieur du ponton accueille des réseaux et servitudes, le pont supérieur permet de réaliser les opérations de manutention et d'embarquement, dans des conditions d'ergonomie et de sécurité optimisées. Ces ouvrages flottants sont parfaitement adaptés au marnage et à la prise en compte de l'augmentation du niveau marin. Les produits de dragage ont également été réutilisés pour le chantier. Une troisième ligne d'amarrage est en cours de conception.

Des travaux sont également engagés sur 430 mètres linéaires de quais reconstruits après-guerre. Afin de minimiser l'impact environnemental mais également de s'adapter aux différentes contraintes du site (activité opérationnelle, risque pyrotechnique,...), la solution retenue consiste à transformer les structures actuelles, poutres caissons portées par piles, en une structure gravitaire monolithique ancrée en pied dans le substratum (comportement de type « quai poids »). Les matériaux extraits du site sont réemployés sur le chantier et des études prospectives sur l'impact du changement climatique ont été prises en compte dans le projet.

Ainsi, au travers des exemples développés, il est montré comment le port militaire de Brest se modernise pour répondre aux besoins opérationnels tout en prenant en compte les aspects environnementaux et de changement climatique.

Article abstract : In 1631, Cardinal Richelieu created the dockyard of Brest. Since then the military port has constantly adapted to the evolution of naval technologies, making the dockyard a component of every naval weapon system. The 2020s to 2030s will see the arrival of a new generation of surface ship, with greater tonnage, smaller crews and more demanding duties, while the structures of the 1950s, docks and port infrastructure, are aging. The military port of Brest is thus undergoing a new transformation through an ambitious master plan combining works, maintenance and operational activity while also responding to environmental and climate issues.

Thus, to accommodate the Navy's new ships, two floating pontoons of 160 meters long with two levels, perpendicular to the docks, were installed in the port. The lower deck of the pontoon hosts networks and easements, the upper deck is used for handling and boarding operations, under optimized ergonomics and safety. These floating structures are perfectly adapted to the tidal range and the rising sea level. Dredged material was also reused on site. A third mooring line is currently being designed.

Work is also underway on 430 meters long of post-war quay. In order to minimize environmental impact and adapt to the site's various constraints (operational activity, pyrotechnic risk, etc.), the chosen solution is to transform the existing structures (box girders supported by piles) into a monolithic gravity structure anchored at the foot in the bedrock ("weight platform" type of behavior). Materials extracted from the site are reused on site, and prospective studies on the impact of climate change have been taken into account in the project.

These examples show how the military port of Brest is modernizing to meet operational needs, while taking into account environmental and climate change issues.



Figure 1 : Vue des quais du port militaire de Brest

Article :

1. Introduction et enjeux

Un port militaire, souvent appelé arsenal¹, est une composante indispensable de chaque système d'arme de la Marine. A la fois chantier naval, abri protecteur vis-à-vis des ennemis comme des éléments naturels, pourvoyeur logistique, siège du commandement, base de projection de troupes, il accompagne les évolutions des missions tout comme celles des technologies navales. Avec l'arrivée d'une nouvelle génération de bâtiments de surface, les ports militaires sont en pleine mutation. A travers l'exemple de Brest et de deux réalisations majeures, cet article illustrera l'adaptation et la modernisation des infrastructures portuaires aux nouveaux enjeux de la Marine Nationale au moyen de techniques innovantes.

2. Brest, un port militaire en pleine mutation

Créé en 1631 par Richelieu, le port militaire de Brest n'a eu de cesse de s'adapter durant les siècles, du programme de frégates à 74 canons au SNA² de classe Barracuda, de la guerre d'indépendance américaine à la dissuasion. Le port militaire de Brest connaît actuellement une nouvelle mutation des infrastructures. En effet, lors de la reconstruction et au début de la guerre froide entre 1950 et 1970, le béton et la précontrainte adhérente ont été utilisés pour de nombreux quais ou infrastructures. 50 à 70 ans après, sous l'effet notamment de l'atmosphère saline, ils ont perdu de leurs capacités résistantes et ne répondent plus complètement aux besoins des forces. En effet, depuis les années 2010, la Marine Nationale est engagée dans un renouvellement important de ses bâtiments de combat, avec l'arrivée des FREMM (Frégates multi-missions), des FDI (frégates de défense et d'intervention), des SNA de type Barracuda, des BRP (bâtiment ravitailleurs de la flotte) ou encore des PH (patrouilleur hauturiers) ... Ces bâtiments de tonnage et de dimensions supérieurs, d'un équipage plus restreint, nécessitant une garantie de service électrique à quai plus exigeante, compatibles aux normes OTAN, constituent une rupture capacitaire. D'autres ruptures technologiques exigent de nouvelles infrastructures, comme l'arrivée en 2024 à Brest de drones sous-marins téléopérés dans la lutte anti-mines dans le cadre du programme SLAM-F (système de lutte anti-mines du futur). Enfin, la Marine réfléchit à s'équiper pour la maîtrise des fonds marins, nouvel enjeu géopolitique. Face à ces changements, il devenait indispensable pour le service d'infrastructure de la Défense de développer des infrastructures renouvelées et adaptées s'appuyant sur de nouveaux concepts industriels dans le cadre d'un schéma directeur ambitieux.

Ce schéma directeur horizon 2030 a réuni tous les acteurs locaux afin de garantir l'activité opérationnelle, l'accueil et le soutien de la flotte actuelle et future tout en maintenant une

¹ Le mot vient de l'arabe dar as-sina'a qui veut dire fabrique, au XI^{ème} siècle, il devient arzano pour définir l'arsenal de la république de Venise

² Sous-marin nucléaire d'attaque

capacité d'entretien du patrimoine industriel et maritime existant (grues portuaires, bassins de radoub avec leur bateau-porte et leur station de pompage, quais industriels ou de stationnement). Un travail d'échelonnement des investissements et des opérations de gros entretien-rénovation a été mené en prenant en compte l'arrivée et la mise en service d'une flotte plus importante, de technicité plus exigeante, aux dimensions croissantes, avec de nouvelles servitudes à concevoir ou de servitudes existantes à régénérer, tout en préservant les périodes d'arrêt technique majeur des bâtiments actuels. Cet exercice a pris en compte les enjeux environnementaux tels que la gestion des sédiments dragués ou les problématiques de prolifération de l'algue *Alexandrium minutum*. En parallèle, le Service d'Infrastructure de la Défense travaille sur différents ports militaires avec le CEREMA³ afin d'étudier leur vulnérabilité face au changement climatique. Si une approche globale a été retenue à partir des différents scénarii du GIEC, les premiers travaux pour Brest mettent notamment en exergue la croissance du risque de submersion des installations portuaires en raison de la montée du niveau des océans, du changement de régime de houle dans la rade et de l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes. Si certains aspects de l'évolution des paramètres restent complexes à modéliser au regard des connaissances scientifiques actuelles, les investissements en cours et futurs prennent en compte ce phénomène inéluctable.

3. Les pontons FREMM : exemple de réponse aux évolutions techniques navales

Outre des capacités militaires accrues, les FREMM présentent des évolutions techniques qui ont un impact important sur les modalités de leur accueil physique au port, parmi lesquelles une coque en « forme tulipée », un fonctionnement avec un équipage plus réduit ou encore une alimentation électrique en haute tension 60Hz (normes OTAN). Ainsi, dans l'objectif d'accueillir les FREMM dans leur port base, la Marine Nationale a choisi d'équiper le port militaire de Brest de pontons plus modernes, spécialement adaptés à ces bateaux mais suffisamment optimisés afin d'y permettre l'amarrage des navires existants types AVISO.



Figure 2 : Ponton FREMM

³ CEREMA : centre d'études et d'expertises sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

Après une procédure d'achat concurrentielle laissant place à l'innovation, l'Etablissement du Service d'Infrastructure de la Défense de Brest a choisi d'y répondre par un ponton flottant d'une conception inédite, de 160 mètres de long et de 17 mètres de large, installé perpendiculairement aux quais. Parmi l'ensemble des ouvrages composant le ponton (caisson, musoir, chaînes, passerelles, coupées, réseaux), le caisson flottant principal en béton armé présente quelques principes novateurs, tels son double niveau de 8,4m de haut avec un pont supérieur sur poteaux totalement libéré pour la circulation et une structure inférieure fermée, constituée de 12 alvéoles étanches visitables. Sa face supérieure se compose d'une dalle particulièrement adaptée au lamanage et optimisée pour la distribution des réseaux électriques (Haute Tension pour les FREMM et Basse Tension pour d'autres navires comme les F70 et Aviso), air comprimé, eau industrielle, gazole, communications ou encore eaux usées. Le pont supérieur permet de réaliser les opérations de manutention et d'embarquement, sur un espace dégagé de tout encombrement, dans des conditions d'ergonomie et de sécurité maximales. La passerelle d'accès sépare le flux piéton des véhicules et permet le passage d'une grue et de camions en charge du ravitaillement quel que soit le coefficient de marée. L'ensemble du caisson flottant, d'un tirant d'eau de 3,4m, est tenu par un complexe chaîne-amortisseur à chaque extrémité pouvant reprendre des efforts de 350 t, directement ancré au quai des flottilles côté Nord-ouest et amarré à un musoir cylindrique en béton posé sur un ballast à 21 m de profondeur côté Sud-est. Cet ouvrage flottant suit la marée, ce qui favorise grandement là-aussi l'ergonomie des embarquements-débarquements et permet d'éviter les corvées de reprise des aussières, en cohérence avec l'optimisation de la taille des équipages sur ces navires. La prise en compte de l'ensemble des efforts générés par l'accostage, la houle et le vent a nécessité des calculs de sollicitations sophistiqués menés au travers d'une modélisation hydrodynamique. Les calculs ont conduit à retenir des défenses d'accostage cylindres en mousse en lieu et place des coutumières défenses caoutchouc.



Figure 3 : Coulage du musoir



Figure 4 : Préfabrication du ponton

Le ponton et le musoir ont été réalisés dans une forme de radoub au sein de la base navale de Brest. Le musoir mesure 23m de haut, a un diamètre de 14m et pèse 7 000t dont 3 200t de sédiments traités issus du dragage. Son voile circulaire, de 600m³ de béton et 120t d'armatures en acier, a été coulé en continu pendant 6 jours grâce à un coffrage glissant, représentant une phase critique et hors normes du chantier. Le remorquage de ces éléments à leur poste définitif a été réalisé par le service des mouvements portuaires de la base navale de Brest avec le concours des lamaneurs du port civil de Brest.

L'opération a fait l'objet, après enquête publique, d'un arrêté d'autorisation au titre de la loi sur l'eau (IOTA) pour ce qui concerne plus particulièrement le dragage de l'assise du musoir et la réalisation des massifs d'ancrage. Ce dossier a notamment permis d'obtenir l'accord des autorités pour valoriser l'ensemble des sédiments dragués en guise de lestage du musoir à hauteur de 3 000 m³ dont plus de 1 800 m³ de vases. En pratique, les sédiments ont été transférés dans un dispositif de traitement spécialement installé sur le quai. Ce dernier avait pour missions de procéder aux divers tris granulométriques et densimétriques (macro-déchets, graviers, sable) puis à la déshydratation des vases.

L'ouvrage⁴ a été mis en service en janvier 2013, satisfaisant pleinement les attentes des utilisateurs. Un deuxième ponton⁵ sur le même concept, livré en 2021, a intégré de légères améliorations issues du retour d'expérience, visant à faciliter les manœuvres et l'accueil des futurs navires de la Marine (FDI notamment). Enfin, le marché d'un troisième ponton plus large et plus lourd permettant les opérations de maintenance des navires est en cours de passation. Il prendra place dans le port à l'issue de la déconstruction d'un épi construit en 1938 et renforcé en 1958 dont les câbles de précontrainte des poutres de franchissement ont amorcé leur corrosion.

⁴ Réalisée par le groupement d'entreprise CHARIER – DCNS – DUCROCQ - LE DU- INGEROP et ARTELIA assistant à maîtrise d'ouvrage

⁵ Réalisé par le groupement d'entreprise CHARIER – ETPO – DUCROCQ - LE DU - ACTEMIUM/CEGELEC et ARTELIA maître d'œuvre,

4. Les quais d'armement : exemple de rénovation d'un quai en béton précontraint

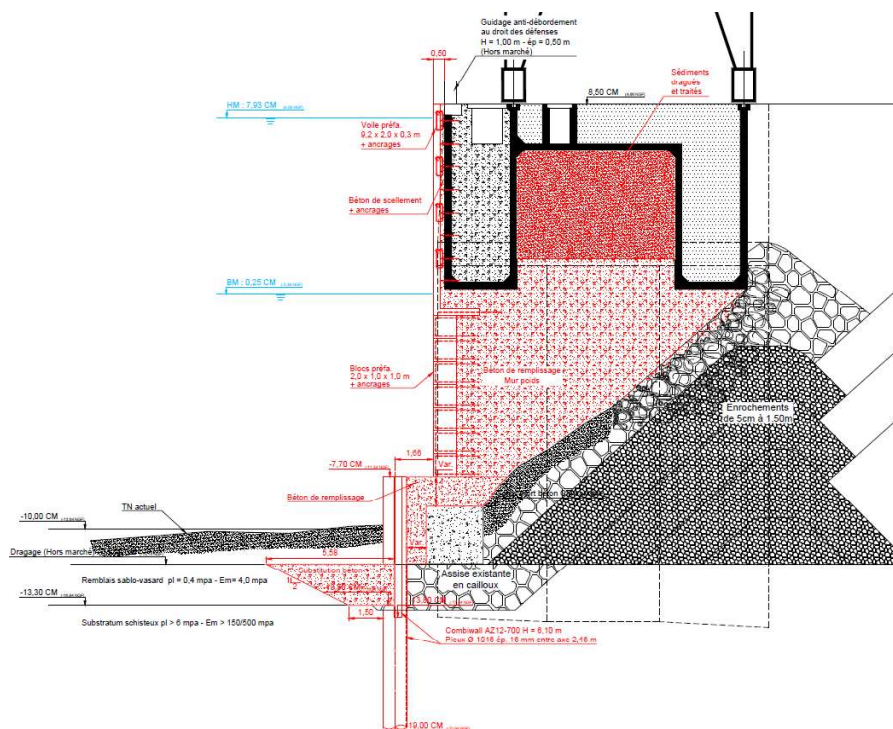


Figure 5 : Quai d'armement droit

Les Quai d'Armement Droit Ouest (QADO) de 135 mètre de long et Quai d'Armement Oblique (QAO) de 295 mètres de long ont pour vocation de permettre l'accostage et l'amarrage en sécurité des navires dont les bâtiments de plus fort tonnage comme les FREMM, les pétroliers ravitailleur (BRF à venir) ou bâtiment océanographique en vue de leurs arrêts techniques pour entretien, voire récemment le porte avion Charles de Gaulle ou les porte-hélicoptères américains en escale. Ces quais permettent ainsi de fournir aux navires l'ensemble des services requis bord à quai : chargement ou déchargement de colis lourds grâce aux grues sur rails, distribution de réseaux fluides, HT, BT, courants faibles. Réalisés entre 1947 et 1958, ces quais sont constitués d'un système de poutres caissons en béton armé et béton précontraint reposant sur des piles gabions en palplanche remplies de béton ou des piles caisson en béton précontraint. Ces ouvrages présentent des pathologies diverses, en lien direct avec leur âge et l'agressivité du milieu marin. De nombreuses campagnes ont été réalisées depuis 1983 afin de caractériser l'ensemble des conditions de site, en particulier la géotechnique, ainsi que l'état des structures existantes et l'évolution de cet état au cours du temps. Les campagnes de diagnostics ont montré, depuis 1995, des pertes assez notables de la résistance des éléments constitutifs des poutres caissons ainsi qu'une dégradation dans le temps de ces éléments. Si les piles caissons sont moins touchés, les piles gabions montrent par endroit des résistances faibles.

Ainsi, l'Etablissement du Service d'Infrastructure de Brest a lancé un marché de conception réalisation dans le but de réhabiliter ces quais tout en répondant aux problématiques techniques et opérationnelles identifiées. Il s'agissait de présenter une solution adaptée à un substratum très résistant mais présentant une importante variabilité de niveau tout en étant pérenne et peu sensible à l'environnement agressif du site. Les travaux devaient fiabiliser au mieux le planning d'intervention afin de garantir partiellement la disponibilité du quai

La solution retenue par le groupement d'entreprises lauréat⁶ a été la transformation des structures actuelles de poutres caissons sur piles en une structure gravitaire monolithique, type « quai poids », ancrée en pied dans le substratum et constitué d'un mur de blocs préfabriqués en béton, en arrière duquel un béton de remplissage est coulé.



Le renforcement est réalisé de bas en haut, et à l'avancement. Le mur de blocs préfabriqués repose sur une assise horizontale en béton soutenue par un écran de soutènement de type combiWall. La substitution des sédiments par du béton devant les pieux amène la raideur de réaction requise pour une maîtrise des déplacements. Les pieux forés du rideau de fondation ancrent solidement dans le substratum la structure monolithique créée. Les palplanches intercalaires qui permettent le bétonnage relient les pieux à la structure existante. Le confortement réalisé en pied est auto-stable en phase provisoire de travaux et ne requiert donc pas de besoin de supportage temporaire sur l'existant avant sa remise en état. Les blocs préfabriqués génèrent une magistrale complète depuis le haut de quai jusqu'au pied et servent ainsi de coffrage pour le bétonnage. Le béton de remplissage réalisé

AIPCN - Journées méditerranéennes 2023 - Page 299

par passe depuis le bas vient enchâsser l'ensemble des éléments existants, piles et poutres caissons, générant à la fois un supportage structurel et une protection contre les agressions de l'environnement marin. Les bétons ont fait l'objet d'une approche performantielle, évaluée en laboratoire, pour assurer leur durabilité vis-à-vis de leur exposition aux agressions maritimes. Enfin, les sédiments, après pré traitement sur le quai puis séchage dans un site annexe, traitement au liant, ont été injectés dans l'ancienne structure du caisson permettant d'optimiser la gestion des produits de dragage. Cette méthode de réalisation permet en outre une consolidation et des tassements graduels et progressifs de l'ensemble de la structure. Il est également à noter que les travaux de réhabilitations de ces quais ont fait l'objet de la prise en compte d'une élévation du niveau de la mer avec une réhausse de 70 cm et un calcul à l'ELU⁷ accidentel à 9,20m au lieu des 8,60m réglementaires (ROSA⁸ 2000).

5. Conclusion et perspectives

Résolument tourné vers l'avenir, le port militaire de Brest a enclenché sa mutation pour faire face à la conjonction d'infrastructures vieillissantes et d'une nouvelle génération de bâtiments équipant les forces. Cette adaptation implique des démarches et des techniques innovantes qui doivent embarquer les enjeux environnementaux mais également de nouvelles menaces comme la cyber sécurité qui concerne les différentes servitudes. La vulnérabilité au réchauffement climatique est un autre enjeu qui est anticipé à la hauteur de l'état des connaissances disponibles. Il n'y a pas de pérennité des missions de la Marine Nationale sans infrastructures portuaires adaptées. Déjà en 1674 Colbert décrivait les enjeux de la construction des ports militaires : « *Les bâtiments des arsenaux de la marine dont la situation doit être proche de l'eau seront construits avec toute la solidité et les précautions nécessaires. L'intendant et l'architecte qui seront chargés de cette construction doivent proportionner leur dessein au nombre des vaisseaux que le Roy voudra tenir dans ses arsenaux et à ceux qui pourront s'y retirer dans de événements extraordinaires. Leurs bâtiments seront assez grands pour contenir avec facilité les appareils et munitions du nombre ordinaire de vaisseaux et avec plus de difficulté ce qui surviendra d'extraordinaire* ».

La mutation du port de Brest se poursuit afin de répondre aux besoins de la Marine Nationale.

⁷ Etat Limite Ultime : état limite correspondant à la résistance de calcul du matériau, à l'équilibre statique de l'ouvrage ou à la stabilité de forme de l'un de ses éléments.

⁸ Recommandations pour le calcul aux états limites des Ouvrages en Site Aquatique



Auteur principal : Macher – Hélène – helene.macher@insa-strasbourg.fr – Université de Strasbourg, CNRS, INSA Strasbourg, Laboratoire ICube UMR 7357, groupe Photogrammétrie Architecturale et GEomatique, INSA Strasbourg, 24 Bd de la Victoire, 67000 Strasbourg – France
Co-auteur : Kila – Yvon – ferrcad@ferrcad.com – Ferrcad – 450 Rue Baden Powell, 34 000 Montpellier – France

Mots clés / Key words: infrastructure, BIM, jumeau numérique, numérisation 3D, capteurs, GEM / infrastructure, BIM, digital twin, 3D digitization, sensors, management, operation, and maintenance

Création de jumeaux numériques d'infrastructures existantes et suivi d'ouvrages : état de l'art des techniques

Avec l'évolution des techniques, il est actuellement possible d'obtenir la géométrie 3D d'infrastructures maritimes sous forme de nuages de points pour des zones émergées et immergées. Dans le cadre de la Gestion Exploitation Maintenance (GEM) d'infrastructures, cette représentation permet de créer des maquettes numériques d'infrastructures existantes. Les nuages de points ont également un grand intérêt pour le suivi de chantier et la vérification des tolérances d'exécution. En effet, l'analyse des écarts entre un nuage de points et une maquette permet de déterminer les éléments existants qui sont dans la maquette et si ces éléments correspondent à la réalité. Une maquette numérique combinée à des capteurs mesurant en temps réel sur site permet d'obtenir un jumeau numérique de l'infrastructure.

With the evolution of techniques, it is now possible to obtain the 3D geometry of maritime infrastructures in form of point clouds for emerged and submerged zones. This representation can be used to create BIM model of existing infrastructures for the management, operation, and maintenance of infrastructures. Point clouds are also very useful for monitoring construction sites and checking construction tolerances. By analysing the differences between a point cloud and a model, it is possible to determine which existing elements are in the model and whether these elements correspond to reality. A BIM model combined with sensors measuring in real time on site makes it possible to obtain a digital twin of the infrastructure.

1. Introduction

A toutes les étapes du cycle de vie d'une infrastructure, les avantages apportés par la mise en place d'un processus BIM sont nombreux. Principalement utilisé en phase de conception et construction, un intérêt grandissant est porté au BIM pour la Gestion Exploitation Maintenance (GEM). Pour tirer profit des avantages du BIM pour une infrastructure existante, il est nécessaire de créer une maquette numérique de cette infrastructure. Diverses techniques d'acquisitions se sont développées pour capturer la géométrie 3D d'un environnement sous forme de nuage de points. A partir de ce nuage de points, il est possible de reconstruire en 3D une infrastructure. Au-delà de la création d'une maquette, la numérisation 3D peut être utilisée pour le suivi de chantier et la réception d'ouvrage. Après création d'une maquette numérique d'une infrastructure existante, il est possible d'équiper l'ouvrage de capteurs pour un suivi en temps réel de son état de santé : le terme de jumeau numérique est employé. Cet article propose d'abord une synthèse des techniques d'acquisition d'infrastructures maritimes. Puis, les possibilités

d'utilisation de nuages de points sont présentées. Le concept de jumeau numérique est ensuite introduit pour la GEM d'ouvrages. Enfin, les premiers développements de l'entreprise Ferrcad concernant la reconstruction 3D d'infrastructures et la réception d'ouvrage à partir de nuage de points sont brièvement présentés.

2. Création de maquettes numériques d'infrastructures maritimes existantes

2.1 Les techniques d'acquisition de la géométrie 3D sous forme de nuage de points

Les infrastructures maritimes sont généralement simultanément en interaction avec l'air, des écoulements de surfaces/souterrains et des sols/sous-sols. Il est important de choisir des méthodologies d'acquisitions adaptées aux différents milieux.

En ce qui concerne les parties émergées, les techniques de photogrammétrie et lasergrammétrie aérienne sont fréquemment employées. [1] proposent l'acquisition par drone d'infrastructures portuaires et la création de modèles numériques par photogrammétrie pour la reconstruction de modèles BIM. [2] utilisent quant à eux un système LiDAR aéroporté pour la modélisation du terrain dans un environnement fluvial. L'avantage des systèmes aériens est qu'ils permettent l'acquisition de zones étendues et qu'ils ne nécessitent pas nécessairement un accès aux infrastructures. Lorsqu'il s'agit de réaliser une maquette numérique d'une infrastructure en particulier et qu'un niveau de détail plus important est requis, les mêmes méthodes peuvent être appliquées depuis le sol.

Pour les mesures topographiques sous-marines, les deux techniques les plus couramment utilisées sont la bathymétrie par LiDAR aéroportée et les échosondeurs multifaisceaux. Comme le soulignent [3], ces deux techniques sont complémentaires. La bathymétrie LiDAR aéroportée ne permet pas d'obtenir d'informations dans des eaux profondes. En raison des préoccupations concernant la sécurité des navires, il est difficile de prendre des mesures dans des eaux peu profondes à l'aide d'un échosondeur multifaisceaux. La photogrammétrie sous-marine et la lasergrammétrie sous-marine permettent également d'obtenir un nuage de points 3D d'une zone immergée mais ces techniques sont adaptées seulement aux eaux claires et non turbides. [4] utilisent par exemple la photogrammétrie sous-marine pour la détection des changements dans la structure 3D des récifs coralliens.

Les modèles 3D issus de mesures hors eau et dans l'eau sont généralement assemblés pour obtenir un modèle complet. Face au manque de recouvrement entre les deux modèles, [5] introduisent un algorithme robuste qui s'appuie sur des entités géométriques et des cibles partiellement immergées, visibles à la fois dans des nuages de points laser et sonar. [6] proposent quant à eux d'utiliser un système intégrant un scanner laser et un échosondeur multifaisceaux monté sur un bateau pour l'acquisition d'une infrastructure portuaire. L'avantage est que le relevé des zones émergées et submergées sont réalisés simultanément et que l'étape d'assemblage est réalisée dès l'acquisition des données.

Lorsque l'on considère des infrastructures existantes, des parties sont bien entendu sous terre. Malheureusement, à l'heure actuelle il n'existe pas de technique permettant d'obtenir un nuage de points 3D de ces parties des infrastructures. Des techniques basées sur l'utilisation d'ondes acoustiques ou d'électrodes permettent d'étudier le sous-sol mais cette étude est souvent limitée à des profils.

2.2 Le processus scan-to-BIM

Le processus qui consiste à capturer la géométrie d'un bâtiment existant ou d'une infrastructure existante sous forme de nuages de points, puis à créer une maquette numérique à partir de ces données est communément appelé scan-to-BIM. Le passage du nuage à la maquette numérique reste largement

manuel en raison du volume important de données, du défi que représente la reconstruction des parties occultées et de l'absence d'informations sémantiques dans les nuages de points. Ce processus est chronophage et nécessite des compétences. L'un des principaux défis aujourd'hui est l'automatisation de la création de maquettes numériques à partir de nuages de points [7].

De nombreuses méthodes sont présentées dans la littérature pour automatiser le traitement de nuages de points. [8] soulignent qu'il existe 3 grands types de méthodes pour reconnaître des objets 3D dans un nuage de points : les méthodes basées sur des modèles géométriques, les méthodes basées sur des descripteurs de points d'intérêts et les méthodes utilisant l'apprentissage profond (*deep learning*).

Les méthodes basées sur des modèles géométriques sont les plus anciennes et les plus éprouvées. Si les éléments à reconnaître sont des formes géométriques simples, des algorithmes permettent d'extraire des primitives géométriques telles que des plans et des cylindres d'un nuage de points. Il existe également des techniques de croissance de région basées sur les normales des points du nuage pour la segmentation automatique de surfaces planaires et non planaires [9]. Enfin, lorsque des modèles CAD ou des objets d'un modèle BIM tel que conçu existent, ceux-ci peuvent être utilisés pour extraire les objets et déterminer leurs paramètres à partir du nuage de points [10]. Les méthodes basées sur des descripteurs de points d'intérêts sont fréquemment employées dans le domaine de la robotique. La reconnaissance et la localisation d'objets sont des fonctionnalités essentielles pour les robots autonomes travaillant dans des applications non structurées [11]. Les méthodes basées sur le *deep learning* sont les plus récentes mais présentent encore de nombreuses limitations notamment lorsque des scènes 3D complexes sont considérées [8].

3. La numérisation d'infrastructures pour le suivi de chantier et la réception d'ouvrages

3.1 Le processus scan-vs-BIM

L'utilisation des nuages de points ne se limite pas à la création de maquettes numériques de bâtiments ou d'infrastructures existants. Dans la littérature, un intérêt grandissant est également porté à la confrontation entre nuages de points et modèles « tels que conçus ». Le terme scan-vs-BIM est fréquemment employé. Ce processus consiste à recaler entre eux le nuage de points de l'existant et la maquette numérique créée dans la phase de conception, et à analyser les écarts entre nuage et maquette numérique [12]. Le recalage entre une maquette numérique et un nuage de points peut se faire de plusieurs manières : de manière absolue en géoréférençant la maquette et le nuage de points, de manière relative (recalage grossier puis recalage fin), ou bien à partir de correspondances basées sur des descripteurs [13].

3.2 Applications

Le processus scan-vs-BIM est utilisé à plusieurs fins. Une première application est le suivi de l'avancement de travaux [14-17]. L'idée principale est d'effectuer des levés d'un chantier épisodiquement et de comparer les nuages de points avec une maquette numérique existante. Ces comparaisons permettent d'identifier à un instant *t* les éléments qui ont été construits et les éléments qu'il reste à construire. L'avancement des travaux peut ainsi être évalué pour vérifier le bon suivi du planning. La Figure 1 présente un exemple de comparaison entre un nuage de points et un modèle 3D. Dans la Figure 1 (c), les éléments construits sont représentés en vert tandis que les éléments qu'il reste à construire sont représentés en rouge.

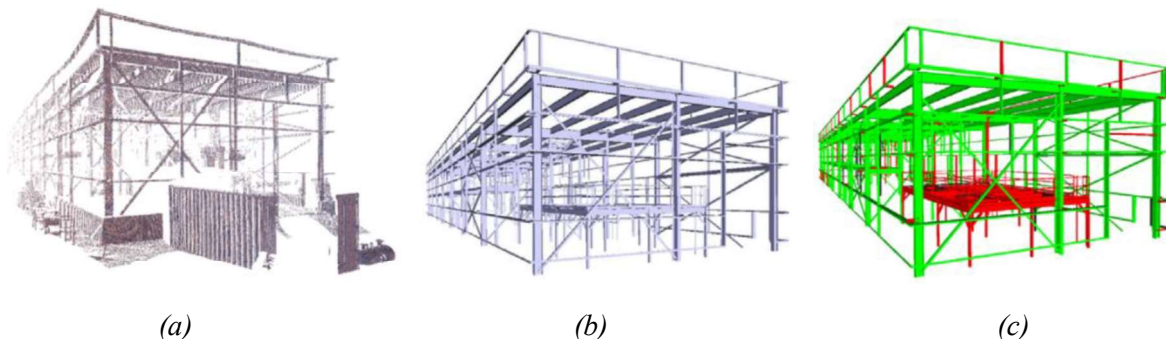


Figure 1 : reconnaissance automatique d'objets dans un nuage de points [14] : (a) nuage de points ; (b) modèle 3D tel que conçu ; (c) reconnaissance d'objets restant à construire (dans le modèle 3D)

Une seconde application est la mise à jour de maquettes numériques [10,18] qui peut intervenir à l'issue de travaux de construction (récolement), de restructuration ou de rénovation. Il s'agit de modifier le modèle pour qu'il corresponde mieux à la réalité en vue de son exploitation. [10] proposent une méthode automatique pour la mise à jour des paramètres d'objets 3D à partir de nuages de points.

Enfin, il est également possible de vérifier les tolérances d'exécutions d'ouvrages. Une analyse des écarts entre modèle et nuage de points permet d'évaluer la qualité de la construction. Les méthodes traditionnellement utilisées sont manuelles et limitées à des points particuliers. L'utilisation d'un nuage de points apparaît comme une solution plus rapide et plus efficace [19-20].

4. Acquisition de mesures pour la surveillance des infrastructures maritimes

4.1 BIM et jumeau numérique

Les méthodes traditionnelles pour l'entretien, la réparation et la reconstruction des structures de génie civil sont basées sur des inspections programmées dans le temps. Des problèmes peuvent être détectés seulement lors des inspections, ce qui augmente le risque de défaillance structurelle. Pour pallier ce problème, l'utilisation de jumeaux numériques a été proposée et devient de plus en plus populaire pour les infrastructures de génie civil. L'utilisation de nouvelles technologies, notamment l'internet des objets (IoT) et le jumeau numérique, peut réduire de manière significative les coûts de maintenance des infrastructures [21].

D'après [22], le jumeau numérique est la combinaison d'un modèle informatique (maquette numérique) et d'un système du monde réel (système de capteurs), conçu pour surveiller, contrôler et optimiser la fonctionnalité des actifs. Un jumeau numérique englobe l'échange de données dans les deux sens entre les objets physiques et numériques. [23] soulignent que le modèle BIM est la base du jumeau numérique mais n'est pas un jumeau numérique. En effet, un jumeau numérique est un modèle lié dynamiquement au monde réel avec des données d'état très récentes. La maquette numérique manque d'interactions virtuelles avec les actifs réels. Néanmoins, le BIM et les nouvelles technologies de réalité virtuelle et réalité augmentée présentent une opportunité unique de documenter, d'interpréter et de visualiser les données relatives à l'état de santé d'une infrastructure dans un environnement 3D et se révèlent très prometteurs dans un large éventail d'applications de surveillance des infrastructures [24].

4.2 Capteurs pour le suivi en temps réel d'infrastructures

Pour récupérer des informations en temps réel relatives à une infrastructure, plusieurs types de capteurs peuvent être utilisés en fonction du phénomène à étudier. [25] utilisent par exemple des capteurs de

pression, des capteurs environnementaux (vitesse du vent, pression de l'air, niveau d'eau) et des capteurs de mouvement pour le suivi de la structure d'un phare historique au large des côtes. [26] ont quant à eux équipé un pont d'accéléromètres afin d'évaluer ses paramètres modaux et d'analyser et de prédire la santé structurelle du pont. Neuf capteurs très sensibles ont été placés le long de la passerelle du pont, et les capteurs ont été configurés pour mesurer les vibrations verticales uniaxiales (Figure 2).

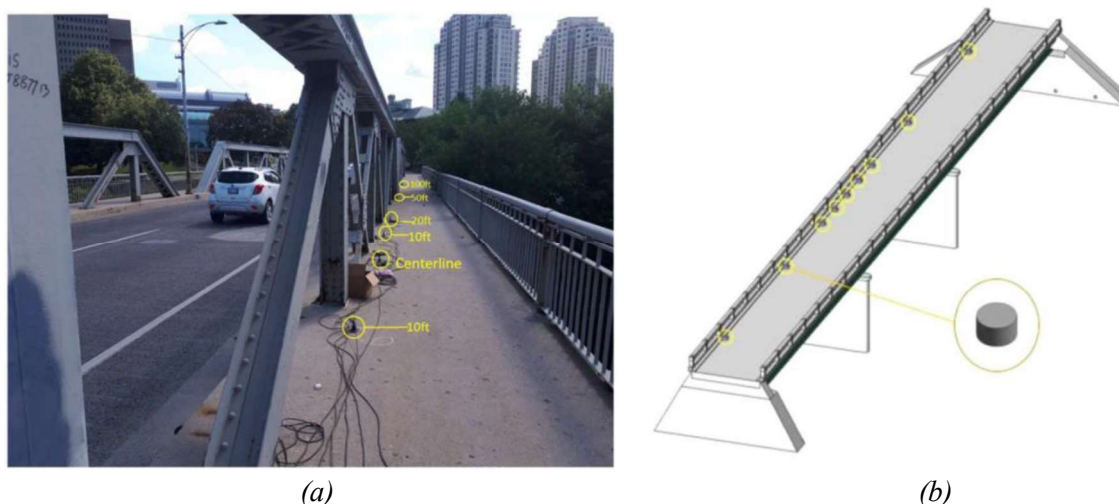


Figure 2 : (a) capteurs installés sur un pont ; (b) modèle 3D virtuel du pont et des capteurs [26]

En équipant les actifs d'infrastructure de capteurs bien choisis et connectés à des systèmes IoT, en agrégeant et en synthétisant les données mesurées et en mélangeant ces données générées automatiquement avec les données d'inspection classiques, il devient possible de générer un historique de données suffisant pour évaluer précisément l'état actuel et prévoir son évolution. D'après (Wenner et al., 2021), le développement rapide des technologies associé à un intérêt et une prise de conscience croissants de la part des propriétaires d'actifs conduira à des progrès significatifs dans ce domaine au cours des prochaines années.

5. Le projet Design by Data

5.1 Description du projet

Ferrcad est un bureau d'étude technique résolument engagé dans l'accompagnement des acteurs impliqués dans le cycle de vie d'un actif en milieu maritime, portuaire et fluvial, dans la mise en œuvre et l'usage de maquettes numériques BIM et de jumeaux numériques. Le projet R&D Design by Data porté par Ferrcad a pour objectif de supprimer les tâches sans valeurs ajoutées dans une chaîne de production en ingénierie. Des outils innovants sont en cours de développement pour assurer un contrôle de qualité et optimiser la conception et réalisation d'infrastructures. Parmi ces outils, le plug-in FerrR3D (Reconstruction 3D) a pour objectif de reconstruire des maquettes BIM à partir de nuages de points et le plug-in FerrSRO (Suivi et Réception d'Ouvrage) s'intéresse à l'utilisation d'un nuage de points pour le suivi de travaux et le contrôle d'ouvrages.

5.2 Détection d'objets dans des nuages de points

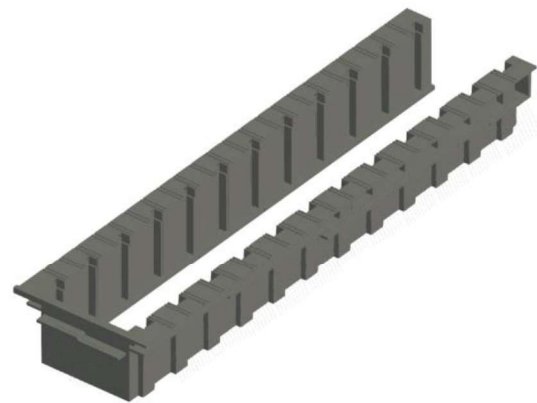
Pour faciliter la mise en œuvre d'un processus automatisé, Ferrcad a regroupé les infrastructures concernées par ses travaux sous formes de « Typos ». Chacune des « Typos » est décrite par des paramètres géométriques, des paramètres sémantiques et des paramètres de dimensionnement. Le plug-in FerrR3D considère en entrée un nuage de points et les objets 3D paramétriques renseignés par l'utilisateur. Par un principe progressif et itératif, les objets sont détectés dans le nuage de points. Les paramètres des objets 3D BIM paramétriques sont mis à jour automatiquement en fonction des dimensions reconnues dans le nuage de points.

5.3 Réception d'ouvrage à partir d'un nuage de points : cas d'étude du projet ATLAS 4300T

Le projet ATLAS 4300T est un projet d'aménagement neuf (chantier naval) concernant une infrastructure particulière : un ascenseur à bateaux (Figure 3). Cette infrastructure baptisée ATLAS a été construite pour La Ciotat Shipyards. Elle a une capacité de levage de 4300 tonnes et possède 7 emplacements à sec pour le stockage et la maintenance de yachts. L'entreprise Ferrcad était chargée de l'AMO du projet.



(a)



(b)

Figure 3 : (a) photo du projet en construction ; (b) maquette numérique de l'ascenseur à bateau

Pour automatiser et optimiser l'étape de contrôle, Ferrcad développe un plug-in nommé FerrSRO. Le logiciel CloudCompare conçu pour la comparaison de nuages de points est utilisé. Le plug-in considère en entrée la maquette géoréférencée et le nuage de points de points géoréférencé. Un recalage fin est d'abord réalisé pour éliminer les éventuelles erreurs de géoréférencement. Les écarts entre les points du nuage et la maquette sont ensuite calculés. Les écarts sont finalement représentés à l'aide d'une échelle de couleurs. La Figure 4 (b) présente le résultat de la comparaison pour une portion de l'ascenseur à bateau. Les points en rouge correspondent aux points pour lesquels les écarts sont supérieurs à 10 cm. Il s'agit de points du nuage que l'on ne retrouve pas dans la maquette, notamment le sol. L'analyse des écarts peut se faire à l'échelle de l'infrastructure ou pour chaque objet 3D. A terme, le plug-in proposera un rapport d'analyse présentant une synthèse des écarts observés et mettant en avant les zones pour lesquelles les tolérances d'exécution ne seraient pas respectées.

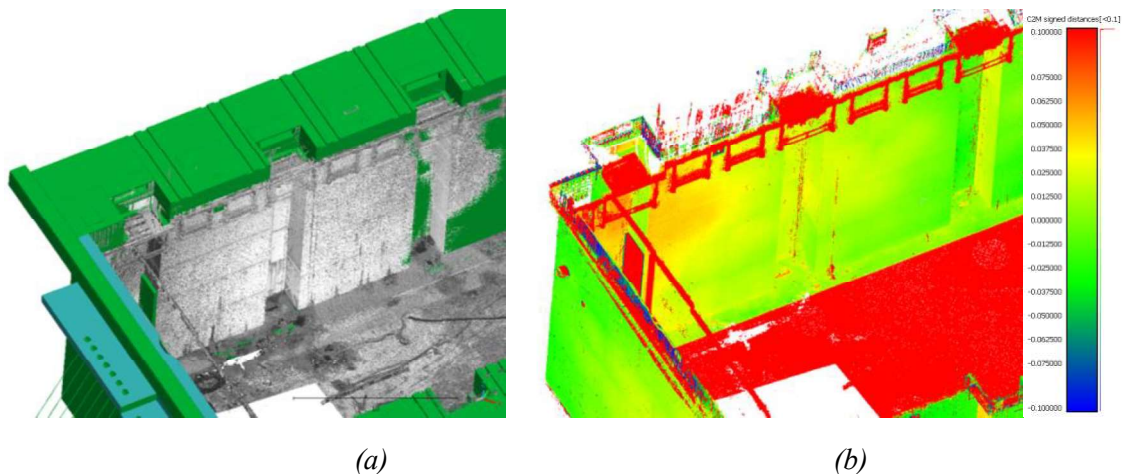


Figure 4 : calcul des écarts entre nuage de points et maquette numérique : (a) maquette numérique et nuage de points ; (b) écarts entre nuage de points et maquette numérique (en mètres)

6. Conclusion et perspectives

Avec l'évolution des techniques, il est actuellement possible d'obtenir la géométrie 3D d'ouvrages sous forme de nuages de points. Cette géométrie 3D peut être exploitée à différentes fins. Il est possible de créer une maquette numérique d'une infrastructure existante en vue de son exploitation. Un nuage de points peut également être exploité pour le suivi de chantier. Enfin, à l'issue d'un chantier, il est possible d'exploiter un nuage de points pour contrôler les tolérances d'exécution pour l'ensemble de l'infrastructure et non pas seulement pour des points en particulier. Les procédés employés sont de plus en plus automatisés. Une maquette numérique combinée à des capteurs mesurant en temps réel sur site permet d'obtenir un jumeau numérique de l'infrastructure. Le jumeau numérique semble être un outil très puissant pour l'étude de la santé de la structure au cours du temps et il ne fait nul doute que cette technologie se développera dans le futur.

- [1] Jofré-Briceño, C., Muñoz-La Rivera, F., Atencio, E., & Herrera, R. F. (2021). Implementation of facility management for port infrastructure through the use of UAVs, photogrammetry and BIM. *Sensors*, 21(19), 6686.
- [2] Szabo, Z., Toth, C. A., Holb, I., & Szabo, S. (2020). Aerial laser scanning data as a source of terrain modeling in a fluvial environment: Biasing factors of terrain height accuracy. *Sensors*, 20(7), 2063.
- [3] Li, S., Su, D., Yang, F., Zhang, H., Wang, X., & Guo, Y. (2022). Bathymetric LiDAR and multibeam echo-sounding data registration methodology employing a point cloud model. *Applied Ocean Research*, 123, 103147.
- [4] Rossi, P., Castagnetti, C., Capra, A., Brooks, A. J., & Mancini, F. (2020). Detecting change in coral reef 3D structure using underwater photogrammetry: critical issues and performance metrics. *Applied Geomatics*, 12, 3-17.
- [5] Moisan, E., Charbonnier, P., Foucher, P., Grussenmeyer, P., Guillemin, S., & Koehl, M. (2015). Adjustment of sonar and laser acquisition data for building the 3D reference model of a canal tunnel. *Sensors*, 15(12), 31180-31204.
- [6] Lucarelli, A., Brandolini, P., Corradi, N., De Laurentiis, L., Federici, B., Ferrando, I., ... & Sguerso, D. (2019, October). Potentialities of integrated 3D surveys applied to maritime infrastructures and to the study of morphological/sedimentary dynamics of the seabed. In *Proceedings of the IMEKO TC-19 International Workshop on Metrology for the Sea, Genoa, Italy* (pp. 3-5).

- [7] Macher, H., Landes, T., & Grussenmeyer, P. (2017). From point clouds to building information models: 3D semi-automatic reconstruction of indoors of existing buildings. *Applied Sciences*, 7(10), 1030.
- [8] Chen, J., Kira, Z., & Cho, Y. K. (2019). Deep learning approach to point cloud scene understanding for automated scan to 3D reconstruction. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33(4), 04019027.
- [9] Khaloo, A., & Lattanzi, D. (2017). Robust normal estimation and region growing segmentation of infrastructure 3D point cloud models. *Advanced Engineering Informatics*, 34, 1-16.
- [10] Rausch, C., & Haas, C. (2021). Automated shape and pose updating of building information model elements from 3D point clouds. *Automation in Construction*, 124, 103561.
- [11] Li, W., Cheng, H., & Zhang, X. (2021). Efficient 3d object recognition from cluttered point cloud. *Sensors*, 21(17), 5850.
- [12] Bosch , F., Ahmed, M., Turkan, Y., Haas, C. T., & Haas, R. (2015). The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The case of cylindrical MEP components. *Automation in Construction*, 49, 201-213.
- [13] Bassier, M., Vincke, S., De Winter, H., & Vergauwen, M. (2020). Drift invariant metric quality control of construction sites using BIM and point cloud data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(9), 545.
- [14] Bosch , F. (2010). Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction. *Advanced engineering informatics*, 24(1), 107-118.
- [15] Jiang, Z., Shen, X., Ibrahimkhil, M. H., Barati, K., & Linke, J. (2022). Scan-vs-BIM for Real-Time Progress Monitoring of Bridge Construction Project. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, 97-104.
- [16] Omar, T., & Nehdi, M. L. (2016). Data acquisition technologies for construction progress tracking. *Automation in Construction*, 70, 143-155.
- [17] Son, H., Bosch , F., & Kim, C. (2015). As-built data acquisition and its use in production monitoring and automated layout of civil infrastructure: A survey. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 172-183.
- [18] Czerniawski, T., Ma, J. W., & Leite, F. (2021). Automated building change detection with amodal completion of point clouds. *Automation in construction*, 124, 103568.
- [19] Li, H., Zhang, C., Song, S., Demirkesen, S., & Chang, R. (2020). Improving tolerance control on modular construction project with 3D laser scanning and BIM: A case study of removable floodwall project. *Applied Sciences*, 10(23), 8680.
- [20] Sharif, M. M., Chuo, S., & Haas, C. T. (2022). Rapid 3D Quality Control in Prefabrication Using a 3D Digital-Templates Framework. *Journal of Construction Engineering and Management*, 148(11), 04022117.
- [21] Mahmoodian, M., Shahrivar, F., Setunge, S., & Mazaheri, S. (2022). Development of digital twin for intelligent maintenance of civil infrastructure. *Sustainability*, 14(14), 8664.
- [22] Liu, C., Zhang, P., & Xu, X. (2023). Literature review of digital twin technologies for civil infrastructure. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*, 100050.
- [23] Wenner, M., Meyer-Westphal, M., Herbrand, M., & Ullerich, C. (2021, October). The concept of digital twin to revolutionise infrastructure maintenance: The pilot project smartBRIDGE Hamburg. In *Proceedings of the 27th ITS world congress, Hamburg, Germany* (pp. 11-15).
- [24] Sadhu, A., Peplinski, J. E., Mohammadkhorasani, A., & Moreu, F. (2023). A review of data management and visualization techniques for structural health monitoring using BIM and virtual or augmented reality. *Journal of Structural Engineering*, 149(1), 03122006.
- [25] O'Shea, M., & Murphy, J. (2020). Design of a BIM integrated structural health monitoring system for a historic offshore lighthouse. *Buildings*, 10(7), 131.
- [26] Singh, P., & Sadhu, A. (2020). System identification-enhanced visualization tool for infrastructure monitoring and maintenance. *Frontiers in Built Environment*, 6, 76.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days

**25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)**

Auteur principal : LALIRE – Vincent – vincent.lalire@egis-group.com – egis – Héliopole Bat D
33 av Georges Pompidou 31131 BALMA cedex – France

Co-auteurs : AUTHIE – Bénédicte – benedicte.authie@egis-group.com – egis – Héliopole
Bat D 33 av Georges Pompidou 31131 BALMA CEDEX – France

KLEIN – Fabrice – F-Klein@bordeaux-port.fr – GPMB – 152 Quai de
Bacalan CS 41320 33 082 BORDEAUX CEDEX – France

Mots clés/Key words : Jumeaux numériques/estuaire/port/modélisation/développement durable/Digital
twins/estuary/harbour/modeling/sustainability

Projet GIROS : des jumeaux numériques pour un développement durable de l'Estuaire de la Gironde

GIROS Digital twins for the sustainable development of the Gironde Estuary

Résumé de l'article:

Egis, en groupement avec Oslandia et Fieldbox, a développé des jumeaux numériques de l'estuaire de la Gironde (GIROS) pour accompagner le Grand Port Maritime de Bordeaux et ses partenaires dans le développement durable du fleuve Gironde : le plus grand estuaire d'Europe. GIROS se présente sous la forme d'une plateforme webSIG (Système d'Information Géographique) et repose sur des modèles numériques et des applications qui permettent le partage des connaissances et l'aide à la prise de décision quant à la gestion et l'aménagement du fleuve avec l'ensemble de la communauté. GIROS, en tant que jumeaux numériques d'un patrimoine naturel, est donc un outil pour l'accélération de la résilience territoriales dans un contexte de changement climatique.

Article's abstract :

Egis, in consortium with Oslandia and Fieldbox, has developed digital twins of the Gironde estuary (GIROS) to support the Grand Port Maritime de Bordeaux and its partners in the sustainable development of the river Gironde : the Europe's largest estuary. GIROS takes the form of a webGIS (Geographic Information System) platform, and is based on digital models and applications that enable the entire community of the river to share knowledge and decision-making on river management and development. GIROS, as the digital twins of a natural asset, is therefore a tool for accelerating the resilience of territories in a context of climate change.

Article :

1. Introduction et enjeux

La Région Nouvelle-Aquitaine dispose du plus vaste estuaire d'Europe. Cette voie de communication historique est également un espace remarquable par ses richesses au sein duquel de nombreuses activités cohabitent (tourisme, pêche, navigation de commerce, culture...).

Le Grand Port Maritime de Bordeaux (GPMB), à l'intérieur de sa circonscription de 130 000 ha, est à la fois gestionnaire du Domaine Public et aménageur du territoire. Ainsi, les actions du port sont guidées par la nécessité de trouver l'équilibre entre préservation écologique et développement économique.

Le GPMB travaille depuis de nombreuses années à l'amélioration de la connaissance du fleuve et de son estuaire grâce à son instrumentation (réseau marégraphique, courantomètres), à ses campagnes de mesures bathymétriques et à l'enrichissement de modèles numériques (GIRONDE XL 3D). Plus globalement, il poursuit et structure les travaux de recherche et de développement sur ces thématiques en développant des projets collaboratifs en réponse à différents appels à projets de niveau national et européen (ANR, ADEME pour le national, INTERREG, CEF et Horizon 2020 pour l'europpéen).

Ces projets ont démontré que l'urgence imposée par les enjeux du changement climatique sur les ressources en eau et le milieu implique une mobilisation encore plus forte autour de la Garonne et de l'Estuaire de la Gironde.

Alors que les premiers impacts du changement climatique sont déjà visibles, l'essor du numérique offre des solutions d'études et d'anticipation des changements à venir, de réduction de la vulnérabilité des territoires. Il apparaît désormais essentiel que les acteurs régionaux se fédèrent afin de mobiliser cette révolution numérique pour développer, au sein de leur métabolisme, la résilience régionale nécessaire afin de s'adapter le plus rapidement possible aux impacts climatiques de demain, et chercher à en atténuer leurs effets, dans un contexte de frugalité budgétaire.

2. Conception du projet

En sachant que de nombreuses entités travaillent également sur ces thématiques avec des contraintes similaires, le GPMB propose aux acteurs de l'eau de mutualiser leurs efforts pour créer d'ici 2025 des jumeaux numériques du fleuve opérationnels, performants et faciles d'accès. Ceux-ci seront notamment utilisés pour la simulation du comportement de la Garonne, la Dordogne et de l'Estuaire de la Gironde afin d'explorer, à travers divers scénarii, les impacts des évolutions de certains paramètres - comme le débit amont, ou encore la turbidité qui alimente le bouchon vaseux – qui menacent tant la vie aquatique que la navigation. Les objectifs principaux de ces outils numériques sont de donner aux opérationnels des outils d'aide à la décision pour la gestion du métabolisme du territoire :

- Partager et développer les connaissances scientifiques et physiques du fleuve ;
- Favoriser les échanges de données et de résultats opérationnels avec d'autres structures ;
- Proposer des outils d'aide à la décision pour atténuer l'influence des activités sur le milieu ;
- Organiser la surveillance du littoral et du fleuve (submersion, inondation, qualité de l'eau, préservation de la vie aquatique ...) et les dispositifs d'alerte ;
- Anticiper les effets du changement climatique et chercher des solutions d'atténuation et de réduction de la vulnérabilité du territoire ;

— Développer l'économie durable sur le fleuve et l'estuaire.

Le projet a été lancé sous la forme d'un partenariat d'innovation, dont l'appel d'offre s'est appuyé à la fois sur une candidature en vidéo, un hackathon (pour la première phase d'offre) et une proposition de maquettage (pour la seconde phase d'offre). Egis a fédéré une équipe performante en associant ses compétences métier et ses compétences transverses avec celles de partenaires IT (Oslandia et Fieldbox) pour se distinguer et remporter le développement du projet.

3. Du modèle aux jumeaux numériques

Les Jumeaux Numériques s'appuient sur l'exploitation d'un modèle hydro-sédimentaire et de qualité d'eau tridimensionnel, construit avec la suite logicielle open source open TELEMAC-MASCARET. Ce modèle régional, couvrant l'intégralité de l'estuaire de la Gironde et ses affluents (jusqu'à Pessac-sur-Dordogne et La Réole, sur la Garonne) ainsi qu'une partie du Golfe de Gascogne (des pertuis charentais au nord jusqu'aux plages des Landes au sud, voir Figure 1), a été développé dans le cadre des projets de R&D GIRONDE XL (2017-2018) puis ANR EMPHASE (2020-2023) sous forme d'un couplage entre les modules TELEMAC3D (hydrodynamique 3D) et GAIA (sédimentaire). Maintenu aujourd'hui par le CEREMA (Huybrechts et al, 2021), il a pour vocation de valoriser la connaissance scientifique acquise sur le terrain, notamment au travers du réseau de données de surveillance estuarienne MAGEST et l'expertise des chercheurs du laboratoire EPOC de Bordeaux. Un tel modèle, fournissant la connaissance des courants 3D, niveaux d'eau, salinité et turbidité dans l'estuaire, est donc l'outil central ayant motivé le projet des Jumeaux Numériques de la Gironde.

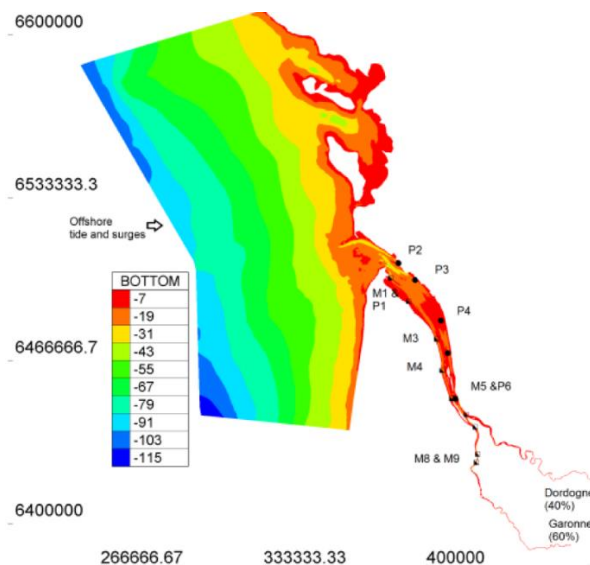


Figure 1 : Domaine couvert par le modèle Gironde XL 3D et bathymétrie associée

Notre équipe a développé l'intégration de 7 nouveaux paramètres dans la modélisation hydro-sédimentaire de la Gironde afin de mieux prendre en compte les conséquences du changement climatique sur le milieu naturel. Le modèle originel a été repris puis étendu notamment par :

- L'adjonction d'un module de qualité d'eau (WAQTEL) couplé au modèle d'origine, permettant de simuler le devenir de traceurs tels que la température, la concentration en oxygène dissous, la charge organique et la charge ammoniacale dans l'estuaire ;
- La construction – sur le même maillage que Gironde XL 3D – d'un modèle de propagation d'état de mer depuis le large avec le module TOMAWAC (propagation de l'action spectrale), couplé

au module TELEMAC2D pour la modélisation de la propagation de l'onde de marée (équations de Saint-Venant) : ce modèle couplé permet ainsi de calculer, entre autres, la hauteur significative et la direction de la houle, variables selon le niveau d'eau et l'interaction avec les courants, en tout point du domaine.

La connaissance de ces paramètres permet de fournir une information complète, à jour et prévisionnelle à chacun des Jumeaux Numériques de l'application GIROS.

La mise en œuvre de ces deux modèles a fait l'objet de nombreux tests dans le cadre de la phase qualificative du projet GIROS (printemps 2022). La paramétrisation opérationnelle a été stabilisée à l'issue de cette phase et doit être confiée, in fine, à un comité scientifique dédié pour la gestion des évolutions opérationnelles, notamment au travers du retour d'expérience de la communauté des utilisateurs.

4. Développements des modèles TELEMAC MASCARET

Deux modèles principaux sont ainsi au cœur de l'application GIROS :

- Le modèle hydro-sédimentaire et qualité d'eau TELEMAC3D-GAIA-WAQTEL, pour la connaissance des caractéristiques physiques et biogéochimiques de l'estuaire,
- Le modèle de propagation TOMAWAC-TELEMAC2D, pour la connaissance des paramètres d'état de mer sous l'effet de la marée.

L'architecture du premier modèle est illustrée sur la Figure 2. Les deux modèles couvrent le même domaine (illustré sur la Figure 1) et travaillent sur le même maillage, avec la méthode des éléments finis (bibliothèques de calcul de la suite open TELEMAC-MASCARET). Les sources de forçages (ou conditions aux limites) des modèles sont détaillées ci-dessous :

- Niveaux d'eau et vitesses des courants liés à la marée aux frontières maritimes : atlas NEA du LEGOS (46 constituants harmoniques interpolés), permettant de simuler n'importe quelle période historique,
- Débits des affluents (Garonne, Dordogne) : observations hydrométriques à la Réole et Pessac accessibles via les services API de la plateforme Hub'Eau (<https://hubeau.eaufrance.fr/>),
- Données atmosphériques (vitesse du vent, température de l'air, pression) : prévisions et réanalyses optimisées (ERA5, CERRA, Météo-France...) du service Open-Meteo (<https://open-meteo.com/>),
- Température et salinité de l'eau : côté mer, prévisions et réanalyses du modèle physique océanique IBI de résolution 0.028° du programme COPERNICUS ; côté fleuves, données disponibles du réseau de surveillance MAGEST (stations Branne, Libourne, Cadillac...),
- Oxygène dissous, charge ammoniacale... : côté mer, prévisions et réanalyses des modèles biogéochimiques océaniques IBI de résolution 0.028° et 0.083° du programme COPERNICUS ; côté fleuves, données disponibles du réseau de surveillance MAGEST (stations Branne, Libourne, Cadillac...),
- Turbidité : côté mer, flux nul ; côté fleuves, concentration des fractions de fines selon des lois empiriques dédiées, fonction du débit sur chaque fleuve,
- Paramètres d'état de mer : prévisions et réanalyses du modèle d'état de mer océanique IBI de résolution 0.05° du programme COPERNICUS.

Les fichiers de forçage des modèles sont générés par des scripts automatisés, qui puisent dans les sources de données ad hoc via des requêtes API. Plusieurs calculs sont ainsi lancés de façon automatique pour alimenter la base de données GIROS :

- Un calcul quotidien, réalisant une prévision de J-1 à J+10,
- Un calcul mensuel, réalisant une prévision de J-30 à J+130, sur la base de tendances pour le moyen terme ; ce calcul ne concerne que la modélisation 3D.

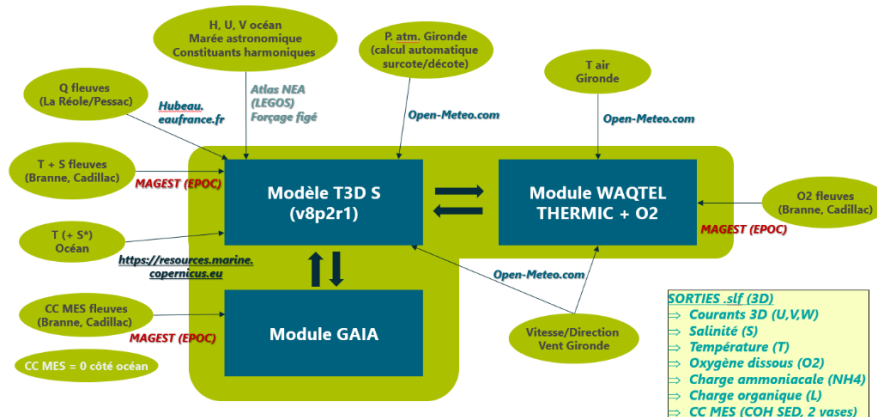


Figure 2 : Architecture du modèle hydro-sédimentaire et qualité d'eau 3D de Giros

Les résultats de ces prévisions, stockés en base de données, fournissent l'information nécessaire à chacun des Jumeaux Numériques (modules « Caractéristiques du Milieu », « Dragages », « Navigation » ... décrits ci-après), notamment par le calcul d'indicateurs opérationnels et l'affichage des données pertinentes pour les usagers.

5. Un outil pour tous

Egis a piloté la production de GIROS en méthode agile et co-construit ce projet ambitieux avec l'ensemble des parties prenantes : Grand Port Maritime de Bordeaux, représentants des métiers liés au fleuve, gestionnaires de l'eau, agence de l'eau et scientifiques.

Egis anime une communauté qui fédère l'ensemble des parties prenantes (gestionnaires de l'eau, collectivités, usagers, entreprise prélevant de l'eau...) afin de se projeter ensemble dans un développement durable.

En portant le développement des outils numériques en open source (avec le concours d'Oslandia et de Fieldbox), Egis a permis l'émergence de modules complémentaires dont les objectifs sont, en premier lieu, de communiquer à chacun la tendance d'évolution de l'Estuaire de la Gironde, puis de permettre aux gestionnaires des différents bassins versants de partager une vision commune des conséquences de leurs actions.

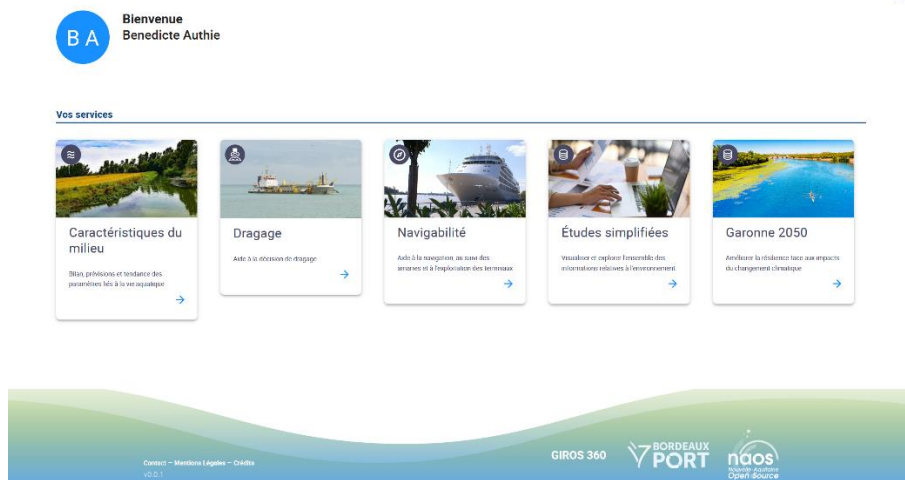


Figure 3 : Accès aux modules

Les modules liés à la connaissance de l'évolution du fleuve sont :

- Le module Garonne 2050 qui permet d'explorer les tendances d'évolution du fleuve à long terme,

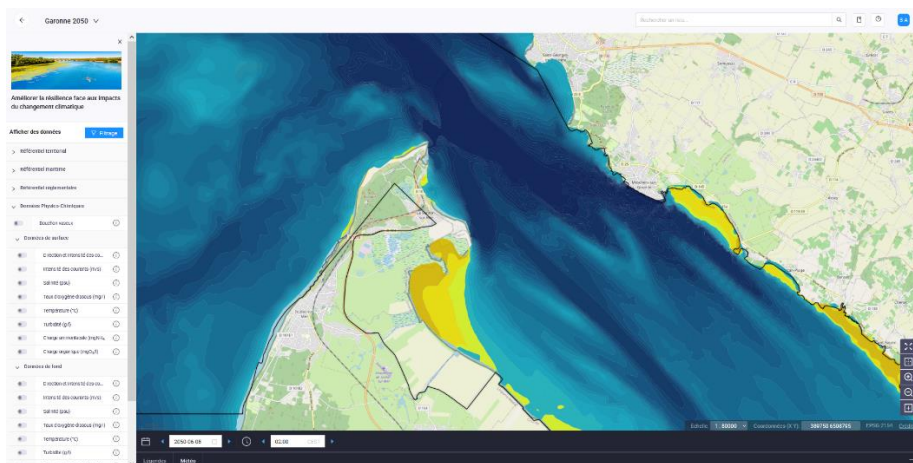


Figure 4 : Module Garonne 2050

- Le module caractéristiques du milieu qui propose des prévisions pour les caractéristiques physico-chimiques du fleuve à 10 jours et des tendances jusqu'à 3 mois,

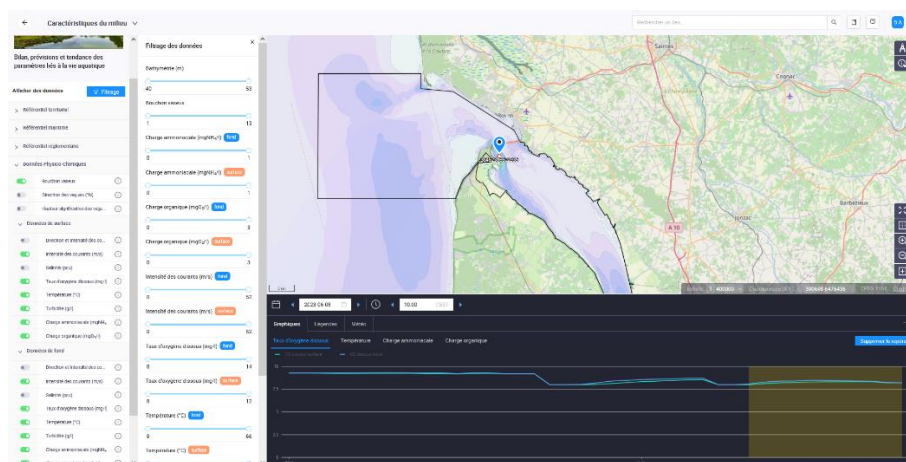


Figure 5 : Caractéristiques du milieu

Grâce à eux, il est possible de développer davantage les connaissances scientifiques et physiques du fleuve et de partager aisément les données et résultats opérationnels avec d'autres structures.

Ces outils contribuent à atténuer l'influence des activités sur le milieu, en organisant efficacement la surveillance du littoral et du fleuve (submersion, inondation, qualité de l'eau, préservation de la vie aquatique ...), notamment à travers des dispositifs d'alerte.

6. Faciliter la prise de décision

Les jumeaux numériques constituent également pour les opérationnels de précieux outils d'aide à la décision pour la gestion du métabolisme du territoire.

Les modules liés aux activités et évolutions des infrastructures du fleuve modules sont :

- Le module dragage qui propose une aide à la définition des stratégies de dragage,

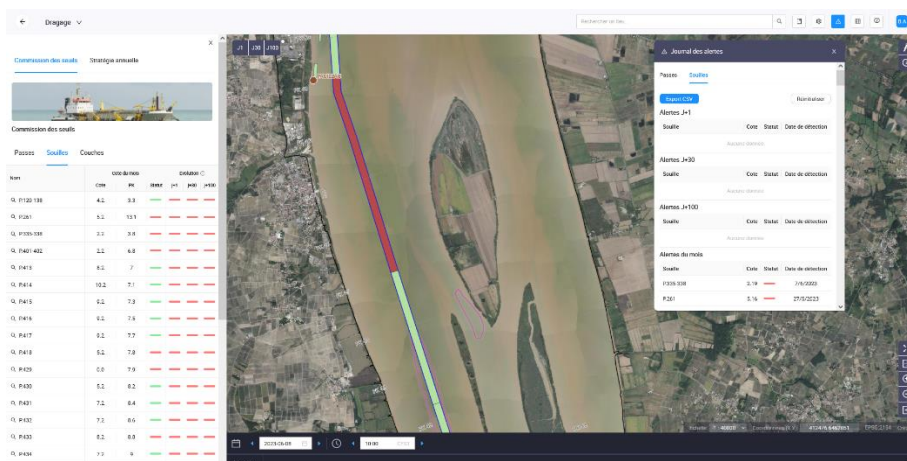


Figure 6 : Module dragage

- Le module navigabilité qui propose une aide à la navigation et à l'amarrage des navires,

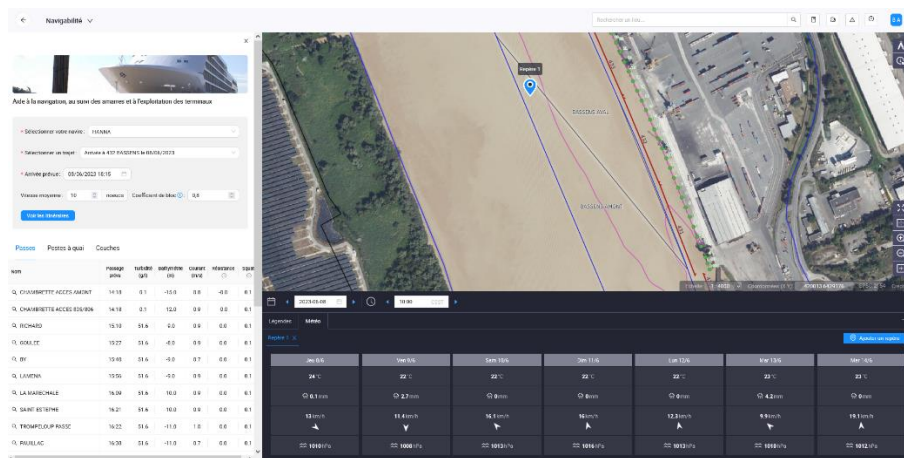


Figure 7 : Module navigabilité

— La module étude qui permet le lancement de modélisations, l'analyse des conséquences de scénarios de pollution, de gestion ou d'aménagements,

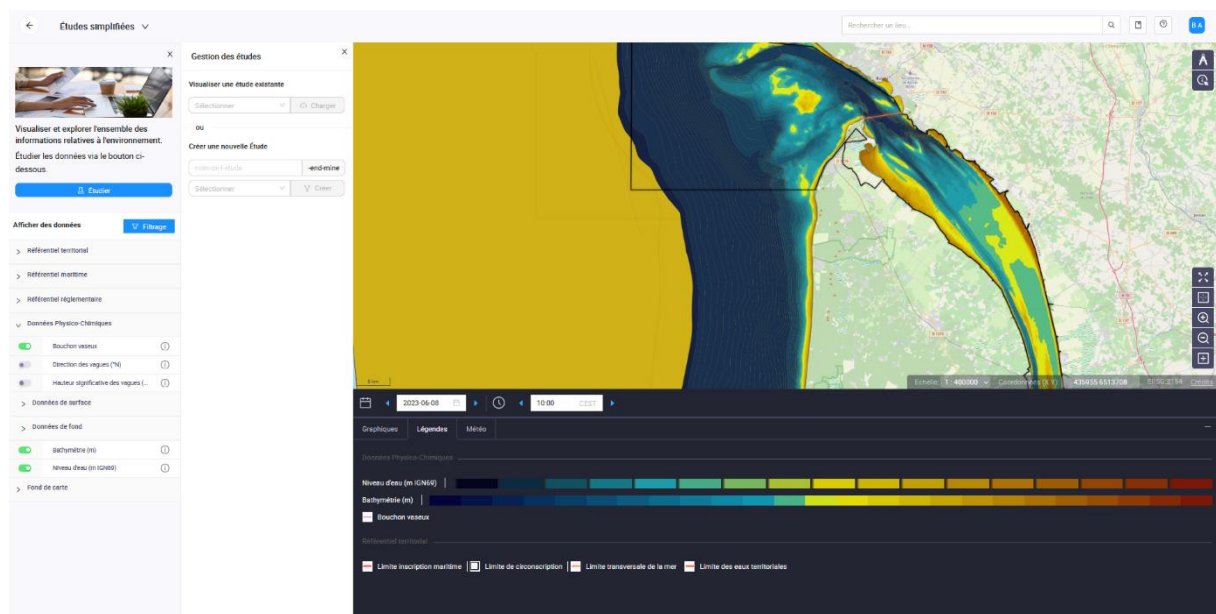


Figure 8 : Module étude

Ces modules permettent d'accompagner les prises de décisions relatives aux métiers du port (évolution de la bathymétrie, simulation de navigation adaptée à chaque navire) et de simuler l'impact de scénarios d'aménagements ou d'événements sur le fleuve.

Ainsi, ils permettent d'anticiper les effets du changement climatique, de chercher des solutions d'atténuation et/ou de réduction de la vulnérabilité du territoire et de développer, in fine, l'économie durable sur le fleuve et l'estuaire.

7. Capteur mobile

Le chantier « Capteur mobile » a pour objectif d'équiper les Jumeaux Numériques d'un instrument permettant de compléter les connaissances sur l'Estuaire. L'utilisation d'un capteur qui pourra être

déplacé permettra en effet d'épargner la pose réelle de capteurs, leur protection et leur manutention mais aussi leur étalonnage et leur maintenance.

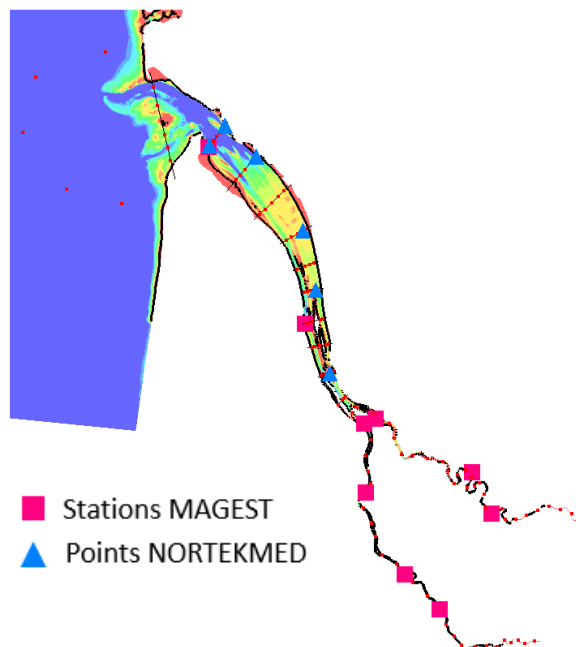


Figure 9 : Réseaux de capteurs existants

En fonction des conditions, les capteurs virtuels prévoient l'évolution des paramètres sur l'ensemble

La principale application du capteur mobile est de contribuer à étalonner le modèle TELEMAC MASCARET.

8. Conclusion et perspectives/Conclusion and perspectives

Giros a été conçu sur la base de micro-services, ce qui lui permet d'être simple, clair et adapté mais aussi adaptable et répliquable. Nous avons lancé un POC sur l'estuaire du Saint-Laurent et avons pu rapidement adapter les jumeaux numériques à ce fleuve.

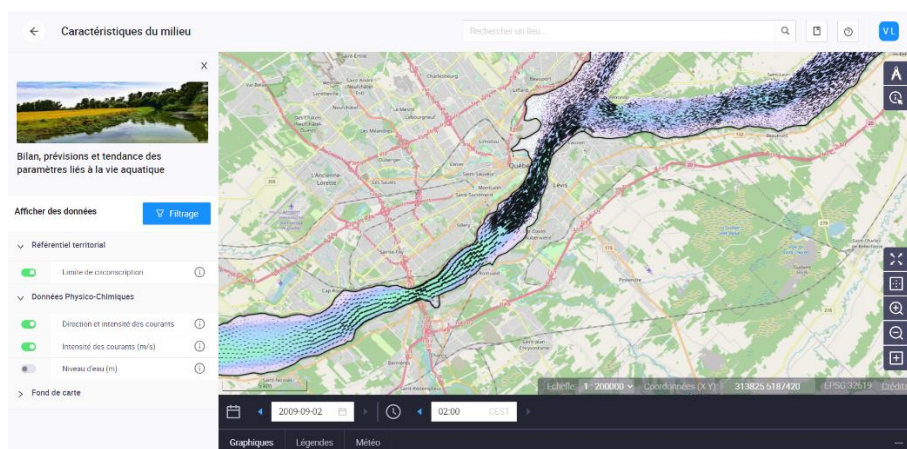


Figure 10 : Jumeaux numériques de l'estuaire du Saint Laurent



Bibliographie :

Huybrechts, N., et al. (2021) : "Three-dimensional sediment transport modeling of the Gironde estuary". Actes conférence SimHydro 2021, Models for complex and global water issues - Practices and expectations, Sophia-Antipolis, juin 2021.

Livre blanc des jumeaux numériques - https://fr.scribd.com/document/469245016/2020-Livre-Blanc-Jumeaunum-Fr?secret_password=X4D1Whs4xHcchDkaIMyt

« Connec(t)win », le Jumeau Numérique développé par nos équipes Egis! - <https://www.rse-egis.fr/all-news/connec-t-win-the-light-modular-and-resilient-digital-twin-for-connected-maintenance>

Changement climatique : Réaménager la ville pour lutter contre les effets du changement climatique au Sénégal - <https://www.egis-group.com/fr/projets/changement-climatique-senegal>

Auteur principal: Jorge Martín Jiménez – jmartin@portsdebalears.com – Balearic Port Authority - Moll Vell, 3-5. 07012 Palma, Spain.

Co-auteurs:

Eduarne Ibarrola-Ulzurrun – eibarrola@kunak.es – Kunak Technologies SL – Parque Empresarial la Muga, 9 - 4º, Oficina 1, 31160 Orcoyen (Navarra), Spain.

José Manuel Vellón Graña – josemanuel.vellon@suez.com – Suez Smart Environmental Solutions Spain, SL (SSESS) – Real, 171. 15402 Ferrol (A Coruña), Spain.

Mots clés/Key words: Air Quality, Monitoring, Modeling, Sensor Network, Management, Digitization.

Air quality monitoring system and Smart Environmental platform in the Ports of the Balearic Islands

Abstract:

The Balearic Port Authority (BPA) has been working since 2016 to determine the level of air quality in its ports and the degree to which port operations affect it in order to introduce necessary improvements. For this purpose, the BPA has installed 25 air quality monitoring points in its five ports (Palma, Ibiza, Mahón, Alcúdia, and La Savina) using KUNAK AIR PRO sensors, which measure SO₂, NO, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, NMVOC, as well as noise and meteorological parameters. The BPA also has a mobile measuring system equipped with GPS installed in a vehicle of its fleet, which allows for *in-situ* pollutant measurements during any event of interest. The information collected by the measurement points is published in real-time on the BPA website.

One of the main features of the sensors used is their new Plug&Play cartridge system, which controls the measurements during each sensor's life cycle. The intelligent patented cartridges (Kunak Smart Cartridge) solve many of the known problems of sensor technology, such as variability, factory and field calibration, etc., all of this without the need to remove the equipment or send it to the factory for calibration.

On the other hand, the Smart Port platform integrates, among others, the air quality vertical, centralizing all the information and real-time of all deployed monitoring stations. The viewing dashboard facilitates proper management, allowing for consultation of the historical data, issuing reports, etc. Through the platform, alerts are managed, allowing analysis of pollution episodes and the influence on air quality of port activity, being able to determine, based on dispersion models and back-trajectories, the impact generated by ships, and identifying possible responsible parties for any pollution event. The Smart Port platform also allows on-demand simulations by the technical team of the BPA, presenting docking scenarios according to the predicted results of the influence on air quality.

In conclusion, the air quality monitoring network of the BPA and the intelligent environmental platform allow for a proper assessment of the impact of port activity on air quality in the ports of the Balearic Islands and their surroundings, in addition to providing an

early warning and forecasting system oriented towards decision-making. In this sense, and recognizing its suitability, the BPA's air quality monitoring network was selected as the "Best Air Quality Monitoring Network" at AQE 2022 (United Kingdom), one of the most significant events in the field of air quality and industrial emissions.

Résumé:

L'Autorité Portuaire des Baléares (BPA) travaille depuis 2016 pour déterminer le niveau de qualité de l'air dans ses ports et le degré d'influence des opérations portuaires afin d'introduire les améliorations nécessaires. À cet effet, l'BPA a installé 25 points de surveillance de la qualité de l'air dans ses cinq ports (Palma, Ibiza, Mahón, Alcúdia et La Savina) en utilisant des capteurs KUNAK AIR PRO, qui mesurent le SO₂, NO, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, NMVOC, ainsi que des paramètres météorologiques et de bruit. L'BPA dispose également d'un système de mesure mobile équipé d'un GPS installé dans un véhicule de sa flotte, ce qui permet des mesures de polluants in-situ lors de tout événement d'intérêt. Les informations collectées par les points de mesure sont publiées en temps réel sur le site web de l'BPA.

L'une des principales caractéristiques des capteurs utilisés est leur nouveau système de cartouche Plug&Play, qui contrôle les mesures pendant chaque cycle de vie du capteur. Les cartouches intelligentes brevetées (Kunak Smart Cartridge) résolvent bon nombre des problèmes connus de la technologie des capteurs, tels que la variabilité, l'étalonnage en usine et sur le terrain, etc., tout cela sans avoir besoin de retirer l'équipement ou de l'envoyer à l'usine pour l'étalonnage.

D'autre part, la plateforme Smart Port intègre, entre autres, la verticale de la qualité de l'air, centralisant toutes les informations et en temps réel de toutes les stations de surveillance déployées. Le tableau de bord de visualisation facilite une gestion appropriée, permettant la consultation des données historiques, l'émission de rapports, etc. À travers la plateforme, les alertes sont gérées, permettant l'analyse d'épisodes de pollution et l'influence de l'activité portuaire sur la qualité de l'air, capable de déterminer, sur la base de modèles de dispersion et de trajectoires inverses, l'impact généré par les navires, et d'identifier les parties responsables possibles de tout événement de pollution. La plateforme Smart Port permet également des simulations à la demande par l'équipe technique de l'BPA, présentant des scénarios d'accostage en fonction des résultats prévus de l'influence sur la qualité de l'air.

En conclusion, le réseau de surveillance de la qualité de l'air de l'BPA et la plateforme environnementale intelligente permettent une évaluation appropriée de l'impact de l'activité portuaire sur la qualité de l'air dans les ports des îles Baléares et leurs environs, en plus de fournir un système d'alerte précoce et de prévision orienté vers la prise de décision. En ce sens, et reconnaissant sa pertinence, le réseau de surveillance de la qualité de l'air de l'BPA a été sélectionné comme "Meilleur réseau de surveillance de la qualité de l'air" à AQE 2022 (Royaume-Uni), l'un des événements les plus importants dans le domaine de la qualité de l'air et des émissions industrielles.

Article:

1. Introduction and aims

Ports promote economic development and employment in port cities. However, they also have some negative impacts. According to Puig, et al. 2022, air quality is the main environmental priority for ports since 2013. Besides, there exist several studies that have analysed the impact of shipping activity on port areas, as well as in urban areas close to ports and it has been observed that the air quality is not only affected by port operations processes but also by ships [1-4]. Since air pollution is one of the biggest environmental risks to health, being one of the main causes of mortality worldwide [5], it is important to understand the impacts of shipping emissions, not only to monitor the air quality in ports but also to evaluate how this port pollution affects nearby urban areas [5-8].

According to the ESPO Green Guide 2021 [9], the Green Port concept requires a differentiated approach between the port authority itself and the various stakeholders in the port area. Thus, the main issue is to find a balance between environmental impact and economic interest. In this context, air quality is a relevant environmental factor in sustainable urban port planning. Hence, the development of adequate air quality monitoring networks is needed to evaluate and reduce risks associated with atmospheric pollution and to know both amounts and types of pollutants attributable to shipping [6, 10].

Knowing this, European ports and shipping companies are already implementing several strategies to reduce their environmental impact, mainly related to the reduction of emissions as required by international regulation [11].

The deployment of a network of sensor-based air quality stations and the integration of this information into a Smart Port platform, allows real-time monitoring of air quality in ports, enabling the detection of critical points and the potential causes of these problems, being able to propose more objective and specific actions for each situation, and to improve the air quality in port cities.

2. Features of the Air Quality Network

Conscious of the fact that atmospheric pollution is a top priority for European ports, the Balearic Port Authority (BPA), in collaboration with the University of the Balearic Islands (UIB), designed an air quality monitoring network aimed at tracking the potential impact of port activities on air quality levels in the 5 major ports of the Balearic Islands (Spain): Palma, Alcúdia, Eivissa, La Savina and Mahón (Figure 1). The sensor systems measure SO₂, NO, NO₂, CO, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁, and, in 6 locations, non-methane volatile organic compounds (NMVOC), as well as meteorological parameters and noise. Additionally, an extra mobile measurement device equipped with GPS has been installed in a vehicle from the BPA fleet, enabling on-site pollutant measurements during any relevant events.

The air quality data measured by the described monitoring network are published in real-time on the BPA's website, assessing the obtained levels according to the European Air Quality Index established by the European Environment Agency and the European Commission in 2017.

Sensor-based air quality systems are currently available to monitor a range of air pollutants and new devices are continually being introduced [12] and complement the measurements of the official air quality stations, at a hyperlocal level and leading to a larger air quality data network.



Figure 1 : Locations of air quality network in Ports in Balearic Islands (Spain) (left). Detail of the air quality network of Palma de Mallorca Port (center). Monitoring station (right).

The accuracy of the devices selected for the project was proven by other independent studies in which Kunak Air Pro have participated, such as the AQSPEC evaluation, Airlab 2022 Challenge (Award: Multi-pollutant sensor with the best accuracy), in which the performance of the sensors and the variability among them were proved by independent organizations. Besides, the particle sensor is certified by MCERTS (UK) as indicative measurements according to Annex I of the European Air Quality Directive 2008/50/EC. Nevertheless, the sensors deployed in the network pass extensive QA&QC procedures in order to accomplish data quality objective requirements. Besides, they have been validated through extensive correlation studies with official stations that use reference measurement techniques.

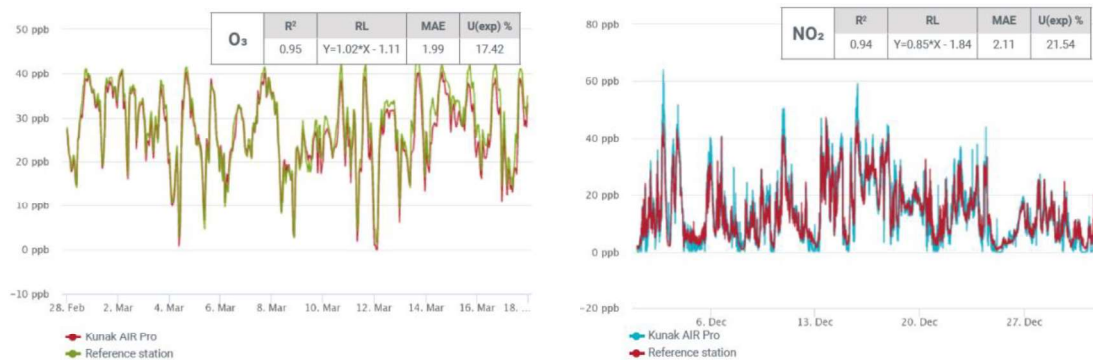


Figure 2 : Examples of correlation studies with reference methods

The Kunak AIR Pro devices feature an innovative sensor system through smart Plug&Play cartridges that can be combined depending on the needs of each case and/or location. Kunak Smart Cartridges

ensure measurement control throughout the life cycle of each sensor (each cartridge is calibrated and validated individually in lab against traceable reference standards) and solve many of the known issues of sensor technology: sensor variability, factory and field calibration, automatic data invalidation, sensor replacement, network operation and maintenance work.

The main characteristics of the sensors used by the BPA for measuring pollutants regulated by the European air quality standards are summarized in Table 1.

	CO	NO ₂	O ₃	SO ₂	PM2.5	PM10
Type	Electrochemical	Electrochemical	Electrochemical	Electrochemical	OPC	OPC
Units of measurement	µg/m ³ , ppb	µg/m ³ , ppb	µg/m ³ , ppb	µg/m ³ , ppb	µg/m ³	µg/m ³
Measurement range	0 - 12.000 ppb	0-5.000 ppb	0-2.000 ppb	0-10.000 ppb	0-2.000 µg/m ³	0-10.000 µg/m ³
Resolution	1 ppb	1 ppb	1 ppb	1 ppb	1 µg/m ³	1 µg/m ³
Operating temp. range	-30 to 50 °C	-30 to 40 °C	-30 to 40 °C	-30 to 40 °C	-10 to 50 °C	-10 to 50 °C
Recommended RH range	15 to 90 %RH	15 to 85 %RH	15 to 85 %RH	15 to 90 %RH	0 to 95 %RH	0 to 95 %RH
Operating life	> 24 months	> 24 months	> 24 months	> 24 months	> 24 months	> 24 months
Limit of Detection	10 ppb	2 ppb	3 ppb	3 ppb	0,5 µg/m ³	0,5 µg/m ³
Repeatability	20 ppb	4 ppb	4 ppb	5 ppb	3 µg/m ³	5 µg/m ³
Response Time	< 30 sec	< 60 sec	< 70 sec	< 60 sec	< 10 sec	< 10 sec
Typical Accuracy - MAE	± 80 ppb	±5 ppb	±8 ppb	±15 ppb	±3 µg/m ³	±4 µg/m ³
Typical precision - R ²	> 0,85	> 0,85	> 0,9	> 0,7	> 0,8	> 0,7
Typical Slope	0,78 - 1,29	0,78 - 1,29	0,85 - 1,18	0,78 - 1,29	0,85 - 1,18	0,85 - 1,18
Typical Intercept (a)	-50 ppb ≤ a ≤ +50 ppb	-4 ppb ≤ a ≤ +4 ppb	-3 ppb ≤ a ≤ +3 ppb	-5 ppb ≤ a ≤ +5 ppb	-2 µg/m ³ ≤ a ≤ +2 µg/m ³	-3 µg/m ³ ≤ a ≤ +3 µg/m ³
DQO - Typical U(exp)	< 20%	< 25%	< 20%	< 25%	< 50%	< 50%
Typical intra-model variability	< 3 ppb	< 1 ppb	< 1 ppb	< 3 ppb	< 2 µg/m ³	< 2 µg/m ³

Table 1 – Characteristics of the sensors

3. Smart Port Platform

For the BPA, having a platform capable of implementing cross-cutting generation of information and knowledge across various service verticals for a smart port would bring about a disruptive leap. This would enable the support and development of different agendas, strategic plans, or action plans based on this technological environment. It would optimize decision-making through the exploitation of collected and analyzed data using state-of-the-art solutions such as Artificial Intelligence, Predictive Analysis, Big Data, and more.

In this regard, the BPA has implemented ELLIOT Cloud, an open-source solution based on Fiware. It boasts high scalability and provides a technological ecosystem capable of integrating information generated by different port initiatives aimed at achieving improvements in their associated goals. Among the different verticals included in the Smart Port Platform (energy, lighting, solid waste, etc.), the air quality vertical (AQV) stands out. This vertical centralizes all the information and real-time data on air quality status and meteorological variables from deployed monitoring stations. This allows for real-time processing, visualization (Figure 3, left), report generation, the definition of thresholds for automatic alerts and the publication of the air quality status of each port on the BPA's website.

The AQV also has a set of analytical and statistical tools for the detailed study of the general information monitored at the stations (temporal trends, polar plots, wind roses, etc.). This helps determine the level of impact generated by ships present in the port and the identification of the source of pollution. As an example, Figure 3 (right) displays polar plots directly on the map. Using these

graphs, it is possible to analyze pollution sources, in which it is observed how the higher concentration of pollutants detected (i.e. SO₂) come from the ships' routes.

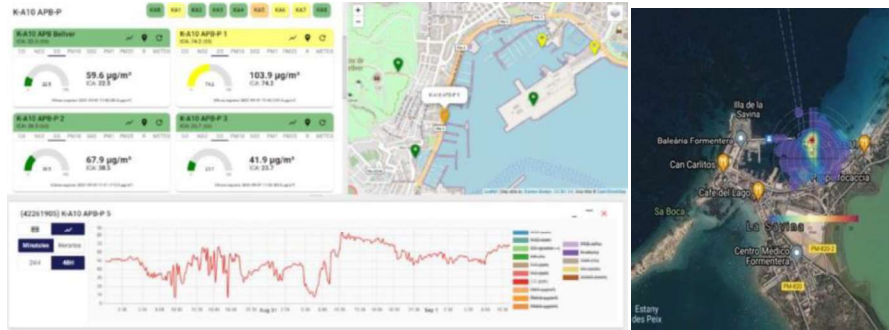


Figure 3: Air quality vertical dashboard (left) and SO₂ polar plot (right)

Additionally, to the mentioned tools, within the AQV, the outputs from advanced air quality diagnostic and forecasting management tools are also integrated. These outputs are based on the application of advanced atmospheric dispersion models for pollutants implemented by SSESS. The implementation of these models has required the integration of a set of complementary subsystems: 1) Pollutant emissions from vessels to be simulated with dispersion models, calculated using emission factors described in the EMEP/EEA methodology for emissions inventories [13]; 2) Online port management and scheduling data, including vessel mooring forecasts in the port, derived from operational management platforms of BPA ports.

These advanced tools allow for the availability of forecast information for informed decision-making, providing automated modelling of pollutant dispersion to predict the impact on air quality from the port schedule. They generate the potential daily air quality impact of the expected ships for the following day, as well as the capability to perform contaminant dispersion simulations upon request by the port operator or environmental manager. This is done to assess the reconfiguration of planned port operations and berthing and the environmental impact that such rescheduling would generate on air quality.

The pollutant dispersion modelling system is based on a system of mathematical models WRF/MMIF/CALPUFF, compiled and installed for Linux platforms [14-16]. The WRF mesoscale model will be used as input to the MMIF pre-processor for obtaining final meteorological fields at a spatial resolution of 500 meters. The WRF is run beforehand at a 1km resolution over the area of interest, initialized with 0.25° spatial resolution data provided by the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) from the GFS. The 5 domains for each of the ports cover an area of 25 to 50 km² around the port facilities with a cell resolution of 250 meters.

With the scheduling of ship mooring during port operations and the alignment at each port dock and the calculated emissions, the daily simulation is performed using the CALPUFF pollutant dispersion model (model recommended by the US-EPA) to predict the potential impact on air quality in the area

of interest. Based on the automatically generated predictions by the system, alerts are generated for potential impacts. This early warning enables the adaptation of new operational strategies, providing support for decision-making to optimize the scheduled configuration of ship dockings. For this purpose, a user on-demand module is available to model new ship mooring configurations in ports.

Furthermore, the interface allows for any type of pollutant dispersion modelling on demand in diagnostic mode, and it can be used to study exceedances detected in the management of measurement alerts. In this regard, the use of inverse modelling techniques (back trajectories) is available, which is based on WRF/CALMET/TRAJ2D [14-16]. The TRAJ2D model traces a series of back trajectories simulating the origin of the air mass carrying a particle to a specific location. The system automates the analysis of the origin of pollution events when abnormal values are reported at monitoring stations configured as alerts: once the event is detected, the system activates the back trajectory model system that describes, through their intersection with port infrastructure the possible origin of emissions.

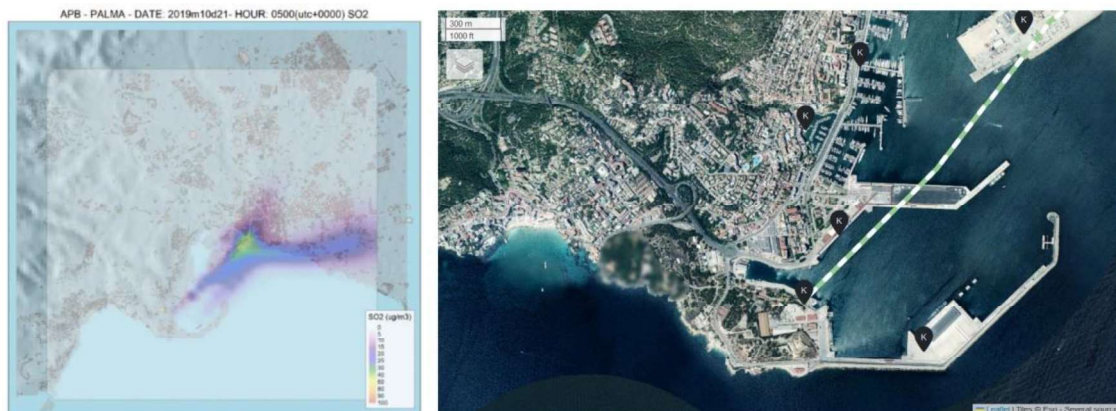


Figure 4: Examples of SO₂ dispersion in port of Palma (left) and back-trajectory (right)

4. Conclusions

The technologies implemented by the BPA allow for the evaluation of the impact of port activity on air quality in the ports of the Balearic Islands and their surroundings, both in diagnostic and forecasting modes.

Through this project, the BPA has an early warning system aimed at informed decision-making, which allows the identification of air quality issues, their analysis, and the exploration of alternatives in port activity management to reduce their impact.

The design of the air quality monitoring network based on sensors enables the monitoring and analysis of air quality behaviour at a spatial resolution consistent with the characteristics of port environments, thus complementing the information from official measurement stations.

5. References

1. Ault, A. P., Moore, M. J., Furutani, H., & Prather, K. A. (2009). Impact of emissions from the Los Angeles port region on San Diego air quality during regional transport events. *Environmental science & technology*, 43(10), 3500-3506.
2. Ruiz-Guerra, I., Molina-Moreno, V., Cortés-García, F. J., & Núñez-Cacho, P. (2019). Prediction of the impact on air quality of the cities receiving cruise tourism: The case of the Port of Barcelona. *Heliyon*, 5(3).
3. Toscano, D., & Murena, F. (2019). Atmospheric ship emissions in ports: A review. Correlation with data of ship traffic. *Atmospheric Environment: X*, 4, 100050.
4. Sorte, S., Rodrigues, V., Borrego, C., & Monteiro, A. (2020). Impact of harbour activities on local air quality: A review. *Environmental Pollution*, 257, 113542.
5. European Environmental Agency. (2022). Health impacts of air pollution. *European Environmental Agency*.
6. Casazza, M., Lega, M., Jannelli, E., Minutillo, M., Jaffe, D., Severino, V., & Ulgiati, S. (2019). 3D monitoring and modelling of air quality for sustainable urban port planning: Review and perspectives. *Journal of cleaner production*, 231, 1342-1352.
7. Perdigueró, J., & Sanz, A. (2020). Cruise activity and pollution: The case of Barcelona. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 78, 102181.
8. Wang, X., Shen, Y., Lin, Y., Pan, J., Zhang, Y., Louie, P. K., ... & Fu, Q. (2019). Atmospheric pollution from ships and its impact on local air quality at a port site in Shanghai. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(9), 6315-6330.
9. ESPO Green Guide 2021. A Manual for European Ports Towards a Green Future (<https://www.espo.be/media/ESPO%20Green%20Guide%202021%20-%20FINAL.pdf>)
10. Gobbi, G. P., Di Liberto, L., & Barnaba, F. (2020). Impact of port emissions on EU-regulated and non-regulated air quality indicators: The case of Civitavecchia (Italy). *Science of the Total Environment*, 719, 134984.
11. Bergqvist, R., & Monios, J. (2018). *Green ports: inland and seaside sustainable transportation strategies*. Elsevier.
12. Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Borday & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?. *Environment international*, 99, 293-302.
13. EEA Report No 13/2019. EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019.
14. Scire, J.S., Strimaitis, D.G., Fernau, M.E. and Yamartino, R.J., 2006: A User's Guide for the CALPUFF dispersion model, Earth Tech Inc., Concord, MA, USA.
15. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp. doi:10.5065/D68S4MVH.
16. Scire, J.S., Robe, F.R., Fernau, M.E. and Yamartino, R.J., 2000: A User's Guide for the CALMET meteorological model, Earth Tech Inc., Concord, MA, USA.

Auteur principal : Albuquerque Otero, Cristina – cristinaalburquerque@porstdebalears.com – Balearic Port Authority – Moll Vell, 3-5. Palma – Spain

Co-auteurs :

- Martín Jiménez, Jorge – jmartin@portsdebalears.com – Balearic Port Authority
- Molina, Benjamín - benmomo@upvnet.upv.es - Universitat Politecnica de Valencia - Camino de Vera s/n 46022 Valencia, Spain
- del Rey Pérez, Amelia - adelrey@prodevelop.es - PRO Develop - C/ Cronista Carreres, 13. 46003 Valencia
- Clemente Pérez, José Antonio – jclemente@prodevelop.es - PRO Develop
- Centella Fuster, Víctor - vcentella@prodevelop.es –PRO Develop
- Vicent Camisón, Juan – jcamison@prodevelop.es – PRO Develop

Mots clés/Key words: Artificial Intelligence, in-situ data, satellite data, Copernicus, CAMS, AQI, pollution forecast, GEOSS

Proactive detection of pollution episodes with AI by exploiting in-situ data, satellite data and port activity

ABSTRACT:

Port of the Future is a recent concept referring to a next generation port able to cope with market challenges by incorporating latest technologies in an effective and efficient way, balancing business revenues and environmental impact. Such a complex task requires real engagement from port operators and stakeholders, especially for big ports and nearby cities where joint strategies are crucial for climate change adaptation and mitigation.

Nowadays, considering the availability of historical data and advances in machine learning techniques, it is possible to analyse and exploit them using artificial intelligence algorithms, including explainability (XAI).

Since 2013, Air Quality has been leading the list of the 10 top environmental priorities for ESPO (European Sea Ports Organization), seconded in 2020 by Climate Change, year when ESPO joined the PIANC leaded *Think Climate* coalition.

Here we present a Transport Management scenario supporting the Balearic Port Authority in environmental monitoring tasks and operations, under the on-going European H2020 research project EIFFEL[1] (GA 101003518). Three use cases were defined to assess the role of GEOSS as the default digital portal for building climate change mitigation applications.

Using in-situ and satellite data the web application can: (1) gather in-situ data from air quality monitoring (NO₂, SO₂, O₃, PM, etc.), (2) predict with ML techniques values for 24 - 48 - 72 upcoming hours, (3) compare predictions with Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), even with lower resolution (10x10 km), (4) Integrate Sentinel 5P imagery (5.5x3.5km) for offshore areas, (5) provide a map-based user interface (UI) where stakeholders can access and manage data and predictions.

Challenges of on-going work are (c1) integration of different data sources, especially port activity and road traffic to establish correlations and design mitigation policies, (c2) design a mechanism for spatial super-resolution of satellite imagery to support use cases and (c3) reduce the bias of satellite readings vs. ground data

Main results that can be presented so far: (r1) tool is able to predict pollutants concentration and compare it to CAMS forecasts, (r2) Super Resolution (SR) mechanism produces results with 5 days delay due to the ERA5 tool availability, (r3) SR can train the model, useful for use case 2 aims of assessing the pollution in a regional offshore area without available in situ data (r4) SR accuracy up to 63,6% vs. AQ ground stations, lower this high BIAS could exceed the timeframe of the EIFEEL research project and could mean another dedicated research.

RÉSUMÉ:

Le port du futur est un concept récent qui fait référence à un port de nouvelle génération capable de faire face aux défis du marché en intégrant les dernières technologies de manière efficace et efficiente, tout en équilibrant les recettes commerciales et l'impact environnemental. Une tâche aussi complexe nécessite un réel engagement de la part des opérateurs portuaires et des parties prenantes, en particulier pour les grands ports et les villes voisines où des stratégies communes sont cruciales pour l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de ses effets. Aujourd'hui, compte tenu de la disponibilité des données historiques et des progrès des techniques d'apprentissage automatique, il est possible de les analyser et de les exploiter à l'aide d'algorithmes d'intelligence artificielle, y compris l'explicabilité (XAI).

Depuis 2013, la qualité de l'air est en tête de la liste des 10 priorités environnementales de l'ESPO (Organisation européenne des ports maritimes), suivie en 2020 par le changement climatique, année où l'ESPO a rejoint la coalition *Think Climate* dirigée par l'AIPCN.

Nous présentons ici un scénario de gestion du transport soutenant l'autorité portuaire des Baléares dans ses tâches et opérations de surveillance environnementale, dans le cadre du projet de recherche européen H2020 en cours EIFFEL[1] (GA 101003518). Trois cas d'utilisation ont été définis pour évaluer le rôle du GEOSS en tant que portail numérique par défaut pour la création d'applications d'atténuation du changement climatique.

En utilisant des données in-situ et satellitaires, l'application web peut : (1) recueillir des données in situ à partir de la surveillance de la qualité de l'air (NO₂, SO₂, O₃, PM, etc.), (2) prédire avec des techniques ML les valeurs pour les 24 - 48 - 72 heures à venir, (3) comparer les prédictions avec le Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS), même avec une résolution plus faible (10x10 km), (4) intégrer l'imagerie Sentinel 5P (5.5x3.5km) pour les

zones offshore, (5) fournir une interface utilisateur basée sur une carte où les parties prenantes peuvent accéder et gérer les données et les prédictions.

Les défis du travail en cours sont (c1) l'intégration de différentes sources de données, en particulier l'activité portuaire et le trafic routier pour établir des corrélations et concevoir des politiques d'atténuation, (c2) la conception d'un mécanisme de super-résolution spatiale de l'imagerie satellitaire pour soutenir les cas d'utilisation et (c3) la réduction du biais des relevés satellitaires par rapport aux données au sol.

Principaux résultats pouvant être présentés à ce jour: (r1) l'outil est capable de prédire la concentration des polluants et de la comparer aux prévisions CAMS, (r2) le mécanisme de super résolution (SR) produit des résultats avec un retard de 5 jours dû à la disponibilité de l'outil ERA5, (r3) la SR peut entraîner le modèle, ce qui est utile pour le cas d'utilisation 2 qui vise à évaluer la pollution dans une zone offshore régionale sans données in situ disponibles (r4) la précision de la SR atteint 63,6% par rapport aux stations terrestres AQ, une BIAS moins élevée pourrait dépasser le calendrier du projet de recherche EIFEEL et pourrait nécessiter une autre recherche dédiée.

Article :

1. Introduction and objectives

Since 2013, Air Quality has been leading the list of the 10 top environmental priorities for ESPO (European Sea Ports organization), seconded in 2020 (when ESPO joined *Think Climate*) by Climate Change and Energy Efficiency.

In 2019 Balearic Port Authority (BPA) deployed a network of air quality sensors consisting of twenty five stations between the 5 ports it manages (Alcúdia, Eivissa, Palma, Maó and la Savina), recording readings every ten minutes of parameters such as CO, NO_x, SO₂, PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, as well as climate conditions like wind speed and direction, relative humidity and atmospheric pressure.

Nevertheless, this amount of data is restricted to the port area and is insufficient for building pollution patterns or abnormal predictions outside the port area or the nearby city, whereas local and regional variability must be considered.

The aim of the EIFEEL pilot 3 is to develop a web application to monitor and predict the impact of port activity on climate change and air quality at a regional scale, using AI, machine learning (ML), data mining and geospatial techniques. Real-time in situ measurements will be combined with historical data from GEOSS, as well as other external sources.

The web application aims to support the BPA in its daily environmental monitoring tasks to minimize or reduce its environmental impact by providing insights on emissions of the main air pollutants (NO₂, SO₂, O₃, PM₁₀ and PM_{2.5}), and its impact on the nearby city and protected areas in maritime routes, as well as optimizing the berthing allocation

The climate change mitigation objectives for this pilot are:

- The monitoring and prediction of pollutions episodes at BPA generated by port activities at the sea-port area and the city of Palma de Mallorca.
- Determination of whether the origin of pollution episodes in port / city is caused by port activity.
- Improvement in the planning and optimization of port activities (cargo, loading/unloading operations, vessels and land traffic) considering pollution episodes forecasts, becoming BPA more efficient ports.
- Improved decision making and minimization of the carbon footprint of the port calls activity and the impact on the city.
- The app will also offer a map-based UI with temporal AQI (following OGC, INSPIRE standards), customised dashboards with pollution KPIs, notifications and data reports for BPA, vessel companies, local authorities and citizens among other stakeholders. This pilot will take advantage of data sets, results and collaboration with other projects sharing complementary objectives, such as PIXEL (H2020) and I2panema (ITEA3).
- The app will be integrated with the cognitive search tool, one of the transversal tools developed in aid of all project pilots.

2. Description of the work and tool development

2.1 Case study area

The pilot 3 study area covers the five ports managed by BPA.

With more than 50,000 annual port calls in 2018, BPA is the leading Spanish Port Authority in number of port calls, and the 2nd in the European ranking. With 2,400,000+ cruise passengers and 6,000,000 regular line passengers the BPA is also the leader in passenger traffic in Spain. As introduced the BPA is already gathering real-time measurements of ground pollution, with valid historical data since September 2019.

2.2 Use cases and scenario

Three use cases have been defined:

- Use case 1: Analysis of atmospheric pollution in Palma. This use case focuses on the study of the correlation between port activity and pollution episodes in the city/port, analysing the following air quality parameters: NO₂, SO₂, O₃ and PM₁₀ and PM_{2.5}, and other external parameters such as wind and traffic in the port/city and nearby areas using the XAI models developed.
- Use case 2: Atmospheric Emissions study in The Freus. The objective of this use case is the monitoring of air quality and emissions from vessels in the Freus area (route between Eivissa and la Savina ports).
- Use case 3: Berths allocation optimisation. This use case aims to: (i) provide advice on berth allocation based on lessons learned (monitoring and forecasting), for both vessel and vehicle emissions on board, (ii) provide insights for optimizing berth allocations and traffic routes from/to port are affecting the least number of people and (iii) identify which vessels and/or berths could change to a less impacting propulsion system.

2.3 Pilot App development

The work for Pilot 3 App development has been focussed both on data gathering and processing, AI pollution forecast models building as well as on the web UI development that supports the decision-making by data and forecast visualization.

2.4 Input datasets and models

2.4.1 Datasets : identified input datasets (sometimes aggregated):

Private data (PR)	Port Operations Data from the Port Management System: real time and historical port calls with AIS positions since 2016.
	Air quality in-situ sensors data from BPA: measures atmospheric pollutant parameters every 10 minutes. Historical data from 2019.
Open data (OD)	AEMET: Weather information from the Spanish Meteorological Agency.
	Regional Government Air Quality reference stations (SO ₂ , NO, NO ₂ , PM _x , DD, VV, TMP)
	Traffic Intensity around Palma's port: from Palma city council
GEOSS related data (GEO)	Sentinel 5P data: TROPOMI sensor through the Copernicus Sentinel Access Hub . Sentinel- 5P TROPOMI has available within 3 hours NRT (near real time) after reading and a spatial resolution of 7 x3.5 km to gather NO ₂ , SO ₂ , O ₃ air quality parameters in NetCDF format. The interpretation of Sentinel- 5P data e.g. is complex and pixel data with q-value > 0.75 has been used for areas with no sensor in-situ data as "informative values" but cannot be compared with in-situ data.
	Copernicus Atmosphere Monitoring System (CAMS) data to assess and compare forecasts. The product Regional Forecasts, Model Ensemble is being used for concentration predictions of parameters NO ₂ , SO ₂ , PM _{2.5} O ₃ , and PM ₁₀ with a spatial resolution of 10x10 km by accessing to https://ads.atmosphere.copernicus.eu/api-how-to

Table 1: Input datasets

2.4.2 Models applied for data processing

Predictions will be made on the basis of in-situ data from the stations deployed in BPA's ports.

For the predictions, XAI models are applied aiming is to develop predictions that not only show forecasts but also what if scenarios, to understand at a glance what would happen with the predictions if the value of such a variable increases or decreases.

In-situ data is received in temporary series, sets of data points collected or recorded at regular time intervals. These sequences are often used to analyse trends and make future predictions. In time series analysis, the temporal ordering of data points is crucial, requiring specialized methods for effective prediction.

An example of the time series used for a Palma station is shown here:

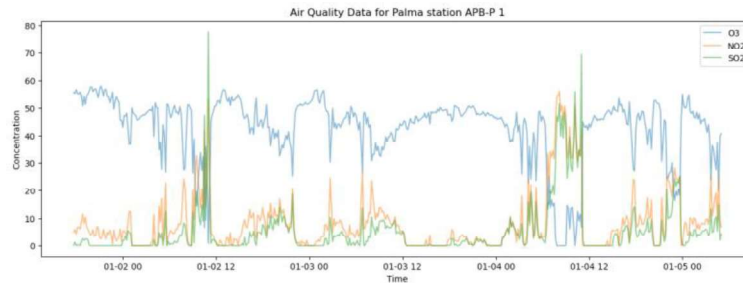


Figure 1: Air Quality data for Palma station APB-P1

For time series prediction, LSTM is used, a special kind of neural network designed for data sequences. LSTM works like a chain of memory cells processing each data point one by one. These cells have special 'gates' that decide what information to keep or forget, making LSTMs great at learning from the history of the series. Essentially, these cells remember important past information and use it to help make better predictions for future data points. LSTM is like a skilled note-taker: it remembers crucial details from earlier in the series to make smart guesses about next outcomes. This ability makes it well-suited for predicting future values in a time series, where the order and history matter.

To evaluate the performance of the predictive models, three key metrics were selected:

- **R² (R-squared):** quantifies how well the model explains the variability in the data. Ranging from 0 to 1, a higher R² indicates a better fit, helping us understand the model's effectiveness across the entire range of the dataset.
- **RMSE (Root Mean Square Error):** offers a tangible way to measure the model's average prediction error, translating it into the same unit as the original data. This is especially useful for interpreting the model's absolute accuracy.
- **RPIQ (Ratio of Prediction to Inter-Quartile Range):** focused on the model's ability to accurately capture outliers, RPIQ is calculated by dividing the inter-quartile range by the RMSE. A higher RPIQ value means the model is better at accounting for extreme values, which is crucial for datasets where outliers carry significant information, such as this one.

These metrics provide a balanced evaluation, with R² assessing overall model fit, RMSE quantifying the average error in understandable terms, and RPIQ evaluating the model's capability to capture outliers effectively.

Regardless of the metrics used to measure the accuracy of the models developed, the results obtained can be compared in two ways:

- Compare with CAMS outcome. The CAMS images are predictions that make use of the [2] ensemble model technique. That is, these predictions are based on the application of different models. With this comparison, the similarity or discrepancy between the model developed and the results given by CAMS could be observed.
- Compare with in-situ data. In this way it would be possible to compare what happened on 'X' day in the future with the predictions developed for the same day. Taking into account that in both cases the origin is the same: the in-situ data. By representing both data sets on the same axes, one could see if the model correctly predicted what happened.

ROAD TRAFFIC DATA ANALYSIS

Using city of Palma network of traffic intensity sensors an analysis of traffic surrounding the port area is being carried out with the aim to include the results in the XAI model developed. Producing traffic patterns and including them into the model as an external variable, it is expected to be able to deduct the road traffic contribution to the pollution models. This approach is due to the fact there are no real time data sources, instead an historical register is provided on demand. Steps:

1. Study traffic data independently to identify traffic profiles.
2. Include the data from the environmental stations and check for correlations between the congestion peaks and increases in the measured values for the pollutants. This is the current status of the study.
3. Include other additional parameters (previous correlation might be directly influenced by wind speed and direction). Next step.

EUROPEAN AQI EEA CALCULATION

The application offers AQI predictions made using satellite imagery (CAMS), at a number of points of interest (POI) to cover offshore areas with no in-situ, POI chosen are in use case 2 area.

Calculation of AQI predictions follow the [3] CAMS training hub notebook <https://ecmwf-projects.github.io/copernicus-training-cams/proc-aq-index.html>



Figure 2: AQI evolution per pollutant and date



Figure 3: PM_{2.5} concentration by date

2.5 Super Resolution mechanism

Spatial resolution augmentation of Sentinel 5p data is of particular interest for this pilot as the satellite imagery has higher resolution than required to implement the use cases.

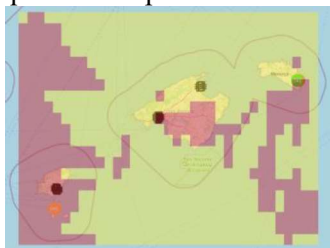


Figure 4: CAMS $PM_{2.5}$ levels in the study area during a Saharan dust intrusion episode

Sentinel 5p readings are gases concentrations of the whole tropospheric column, while in-situ sensors are measuring ground level concentrations. Both concentrations cannot be compared without further treatment. To estimate the ground level concentrations, it's been used Sentinel-5P satellite observations of NO_2 , O_3 , SO_2 and CO , meteorological data from ERA5 and GTOPO30 elevation data to train the XGBoost model with one year in situ ground measurements from over 3000 stations in Europe provided by the European Environmental Agency (EEA). Based on the first validation results, the NO_2 and O_3 models perform well and achieved mean absolute errors (MAE) close to the state-of-the-art methods. On the other hand, the validation results for SO_2 and CO ground level concentrations are not so well and with data gaps due to masking - exclusion of pixels with low quality values.

Therefore, the focus is on NO_2 products and results are being evaluated at the moment of writing this paper in order to assess if they can have value in current or future processes and algorithms.

The measurements from a dense network of air quality ground stations can be potentially acquired real-time and used to infer ground level concentrations of various air pollutants from Sentinel 5p.

Through ML-based methods combining in-situ ground measurements with regression models information about the spatial distribution of air pollutants could be derived. DL-based algorithms, trained with a large number of in-situ measurements collected from AirBASE (Air Quality e-Reporting data repositories maintained by the European Environmental Agency - EEA) can also be applied when in-situ measurements are not available, as required in use case 2. Additionally, model-based methods, will also be tested that can infer ground-level concentrations from satellite data by using a chemical transport model instead of in-situ measurements.

3. Conclusion and perspectives :

- The tool is able to predict pollutants concentration and compare it to CAMS forecasts
- Super Resolution (SR) mechanism produces results with 5 days delay due to the ERA5 tool availability. SR can train the model, useful for use case 2 aims of assessing the pollution in a regional offshore area without available in situ data
- SR accuracy up to 63,6% vs. AQ ground stations, lower this high BIAS could be another project
- New launching of Sentinel 4 and Sentinel 5 are promising in terms of improving the temporal resolution and detection accuracy

REFERENCES

- [1] Eiffel: <https://www.eiffel4climate.eu/>
- [2] <https://towardsdatascience.com/ensemble-models-5a62d4f4cb0c>
- [3] Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) Data Tutorials: <https://ecmwf-projects.github.io/copernicus-training-cams/intro.html>

Ref. Author:

Antonio Tomás – antonio.tomas@unican.es – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain

Co-authors:

David Lucio – david.lucio@unican.es – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain

Eva Romano – eva.romano@unican.es – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain

Gabriel Díaz-Hernández – diazg@unican.es – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain

Javier L. Lara – lopezjav@unican.es – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain

Iñigo J. Losada – losadai@unican.es – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain

Keywords : Machine Learning, port infrastructures

Title of the article: Applications of Machine Learning techniques to assist the design, construction and operation of port infrastructures

Résumé de l'article:

L'étude rationnelle des différentes phases du cycle de vie d'une infrastructure portuaire (dessin, construction, exploitation et démantèlement) pour leurs différentes échelles de temps (court, moyen, long et très long terme), implique la résolution de certains défis technologiques.

À cet égard, les progrès dans le domaine des bases de données (bases de connaissances) qui caractérisent le comportement des systèmes portuaires sont cruciaux. Par exemple, grâce au développement des modèles numériques et des capacités de calcul, il est désormais possible de définir toutes les conditions méta-océaniques susceptibles d'avoir un impact sur une infrastructure tout au long de sa durée de vie. En outre, d'autres données disponibles nous permettent de connaître l'ensemble du trafic (et ses caractéristiques) qui a circulé dans un terminal donné au cours des dernières années.

À partir de ces bases de connaissances existantes, différentes techniques statistiques peuvent être appliquées pour organiser, sélectionner et extraire des informations utiles pour différentes applications liées au dessin, à la construction ou à l'exploitation d'infrastructures portuaires.

L'utilisation de ces techniques nous permet de gérer correctement les informations disponibles, en prenant en compte et en caractérisant l'incertitude intrinsèque des données.

Cette communication présente les résultats de certaines applications développées par IHCantabria, basées sur l'utilisation de techniques d'apprentissage automatique pour améliorer la dessin, la construction et l'exploitation des infrastructures portuaires, telles que : 1) Un système d'alerte précoce pour soutenir la construction du port d'Açu (Brésil), en fournissant à l'avance des conditions de travail quotidiennes sûres et réalistes (pour construire, transporter et ancrer des caissons en béton et pour construire des crêtes de caissons en béton pour différentes dispositions) 2) Projection des risques liés au changement climatique sur 122 ports de Galice (Espagne), 3) Caractérisation avancée du service de remorquage du port de Santander (Espagne), prédisant le nombre et la puissance des remorqueurs nécessaires pour les opérations de fret général 4) Prévision de l'opérabilité des navires amarrés au Las Palmas port (Espagne), pour prévoir les niveaux de sécurité et d'efficacité des opérations portuaires.

Enfin, quelques remarques finales et leçons apprises sur l'utilisation des techniques d'apprentissage automatique pour les applications d'infrastructure portuaire sont résumées.

Article's abstract:

The efficient study of the different phases of the life cycle of a port infrastructure (design, construction, operation and decommissioning) for their different time-scales (short, medium, long and very long term), involves solving some technological challenges.

In this respect, progresses in the field of databases (knowledge bases) that characterizes the behavior of port systems is crucial. For example, thanks to the development of numerical models and computing capabilities, it is now possible to define all the met-ocean conditions that would impact an infrastructure throughout its lifespan. Furthermore, other available data let us know all the traffic (and their characteristics) that has operated in a given terminal in recent years.

Based on these kinds of existing knowledge bases, different statistical techniques can be applied to organize, select and extract useful information for different applications related to the design, construction or operation of port infrastructure. The use of these techniques allow us to properly manage the available information, taking into account, and characterizing the intrinsic uncertainty of data.

This communication present the results of some applications developed by IHCantabria, based on the use of machine learning techniques to enhance the design, construction, and operation of port infrastructures, such as: 1) An early warning system to support the construction of the Port of Açu (Brazil), providing daily safe and realistic working conditions in advance (to build, transport and anchor concrete caissons and to build concrete caisson crests for different layouts)

2) Projection of climate change hazards on 122 Ports of Galicia (Spain), in a high-resolution downscaling framework dealing with multi-model and multi-scenario climate projections 3) Advanced characterization of the tugboat service of the Port of Santander (Spain), predicting the number and power of tugboats required for general cargo operations 4) Prediction of the operability of the berthed vessels at Las Palmas Port (Spain), to forecast the levels of safety and efficiency of port operations.

Finally, some concluding remarks and lessons learned on the use of machine learning techniques for port infrastructure applications are summarized.

Article:

1. An early warning system to support the construction of the Port of Açú (Brazil)

Harbors construction and management in highly exposed locations (i.e. severe met-ocean conditions) is a challenging issue. Construction managers demand, not only the information about wave and wind conditions during construction, but also their influence and interference with daily construction activities, first, to reduce accidents, and second, to improve the management of the construction agenda along different stages.

Aware of this problem, in the last few years IHCantabria has been working on the development of a new methodology to solve these problems and to generate a new set of tools based on machine learning techniques to aid the constructors and managers of ports infrastructures. To illustrate the application of the new early warning system, and to better understand the methodology, the tools and the results, one example is presented: the early warning system for the construction of Açú TX-1 terminal in Brazil, built by the company FCC Citizen Services within the Joint Venture FCC Tarrío TX-1 Construção LTDA.

This operational system allows planning the operations in advance (more than a week forecast) and realistic (assimilating in-situ instrumental information), from the numerical prediction of wind, sea level, waves, long-waves, agitation and overtopping, taking into account the geometric evolution of the works in each construction stage. The system produces daily safe working conditions (1) to transport the caissons from Río de Janeiro to the port of Açú, (2) to construct the caissons, (3) to anchor the caissons and (4) to construct the crest.

The operational system has been successfully structured in several modules that numerically model, with the latest generation tools, the different processes at the most appropriate scale: operational system of propagation (SWAN model, Booij et al., 1999), operational system of agitation (MSP model, based on the elliptic Mild SloPe equations, Diaz-Hernandez et al. 2021) and operational system of overtopping (IH2VOF model, Losada et al. 2008). The numerical runs have been carried out for each configuration and phase of works, updating the results according to the constructive and realistic progress of the works. This huge knowledge base is managed using machine learning techniques, the operational system does not dynamically run the numerical models, it uses a hybrid numerical-statistical methodology (see Camus et al. 2011) to provide quickly and truthfully results.

Finally specific working thresholds have been defined and validated on site (for transporting the caissons, anchoring the caissons and work on the crest) which are automatically crossed with weather forecasts. With this procedure, working parts (red, yellow and green) are generated daily and distributed via web and e-mail (see Figure 1).

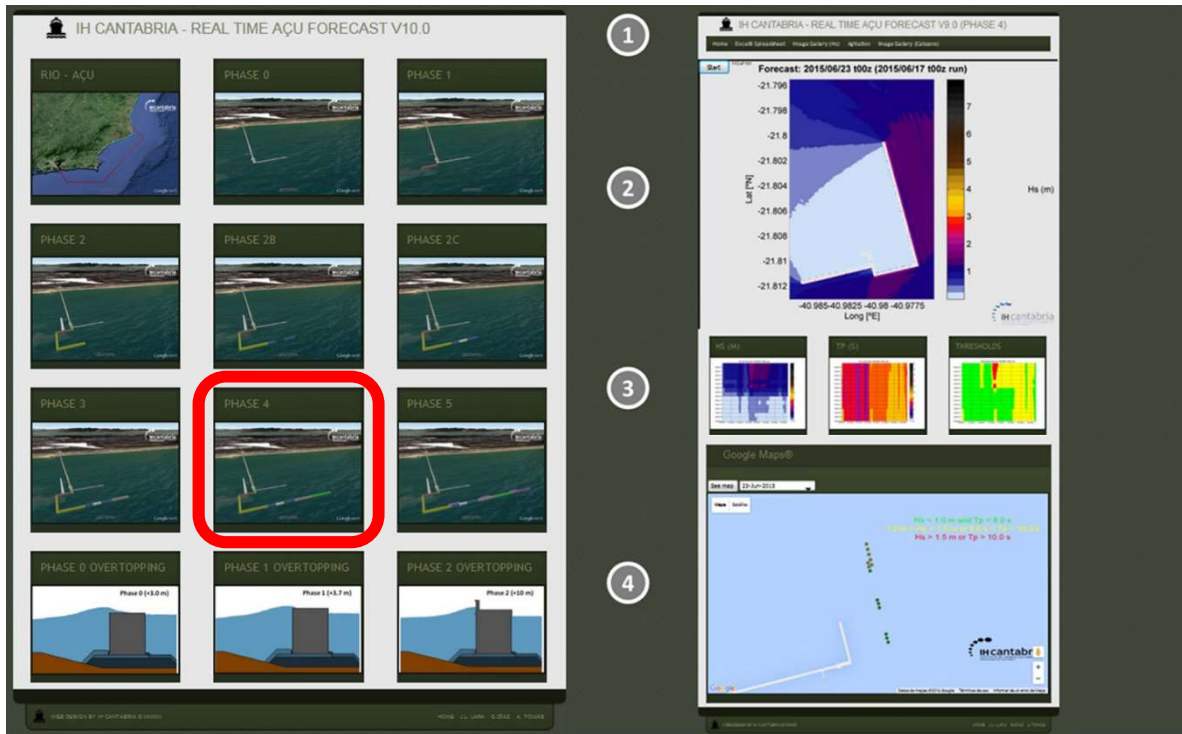


Figure 1: Left panel: Initial view of the web page of the early warning system for the construction of Açú TX-1 terminal in Brazil with all phases. Right panel: General view of the web page of the PHASE 4 module. (1) Access to the Excel sheet. (2) Animation with 180-hourly the spatial H_s prediction. (3) Time series of the H_s and T_p prediction and the thresholds in all the locations of caissons for anchoring. (4) Geo-spatial representation of results for each prediction horizon.

2. Projection of Climate Change hazards on 122 Ports of Galicia (Spain)

Impacts on coastal structures triggered by climate change represents one of the major challenges to be addressed by port engineers in following decades mainly due to sea-level rise (IPCC 2019). Such growing concern motivates the developing of realistic impact and risk assessment frameworks with a reliable hazard estimation for implementing cost-efficient adaptation strategies (Toimil et al. 2020). In this work, the methodology developed by Lucio et al. (under review) is applied to study the evolution in time of wave weather events in a coastal site in a context of climate change on 122 small-sized and medium-sized ports in the northwestern Spanish region of Galicia.

The methodology is structured in three steps. Firstly, offshore high-resolution climate change projections are collected. Several climate models used to characterize wave and storm surge, covering

the baseline (BL, 1985-2005) and two plausible climate change scenarios (RCP4.5 and RCP8.5) both in the short term (ST, 2050) and long-term (LT, 2100). Secondly, a hybrid downscaling approach (Camus et al. 2011) is applied to propagate offshore wave dynamics to every regional port. The challenge is including climate change effects (changes on waves and sea-levels taking place at the same time) into a highly-efficient wave propagation strategy due to the extensive volume of climate data involve. In this context, we suggest expanding this hybrid downscaling approach to encompass a multi-model and multi-scenario analysis.

The initial step focuses on identifying a reduced subset that represents variations in wave climate. This selection is based on the Maximum Dissimilarity Algorithm (MDA) as explained in Camus et al. (2011). Then a high-fidelity numerical propagation is applied to downscale the reduced subset representing the whole climate variability for any climate change scenario to the study sites. A phase-averaged wave model (Booij et al.1999) is applied to model wave transformation processes accurately.

Finally, in the last stage of the downscaling framework, central and extreme wave regimes are obtained. Subsequently, we obtain multivariate continuous-time hourly time series at the target locations using a dependable quality-controlled downscaling approach that is tailored to the local scale. This approach serves as motivation for the development of an innovative multivariate long-term model, computing changes in extreme waves events due to climate change.

3. Advanced characterization of the tugboat service of the Port of Santander (Spain)

The port towing service is one of the most important port services. With certain exceptions, it is nowadays essential that the majority of vessels entering or leaving a port make use of the towing service for safety reasons. The port towing service plays an essential role in the maritime transport chain, that is accentuated when it is taken into consideration that it such port service can represent more than 80% of the port scale costs. Therefore, it is very interesting for a Port Authority and for the port to have a tool that allows sizing and designing the service in the most appropriate and efficient way possible, which would lead to a rationalization of the fees and, subsequently, an increase in competitiveness.

The dimensioning of the port towing service requires defining (1) the number of tugboats and (2) their pulling capacity. In general, it is subjectively defined only based on the historical experience of the port's needs, considering the usual type of vessels, as well as the prevailing weather conditions. In this sense, there is not a technical methodology for selecting the suitable number of tugboats and their related pulling capacity. Here, a new approach based on machine learning techniques is presented to analyze such port service on The State-owned Spanish Port System. In particular, The Port of Santander located in the Cantabrian Sea, is taken as an example to analyze such port towing service for General cargo vessels.

The objective is to build a new predictive tool for the towing service (number of tugboats to be used for port entry/exit, required pulling and engine power) for the GENERAL CARGO typology according to the individual ship characteristics (Length overall, beam, draft, gross tonnage and deadweight tonnage) and the particular weather conditions (waves, winds and sea-level) in the operation. It is illustrated in Figure 2.

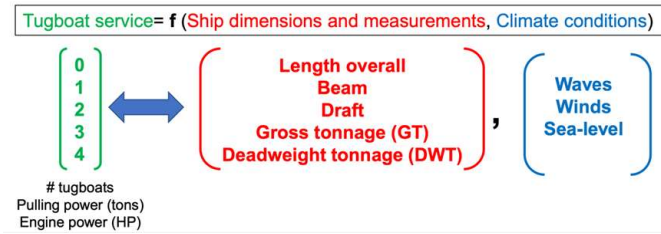


Figure 2: Overall methodology for training the machine learning-based tool predictive tool to predict the towing service.

The development of the tool is divided into two steps. Firstly, a training phase tries to identify correlation relationships between ship characteristics, climate conditions and the port towing service. It is fed by historical data. In this regard, a large database from 2015 to 2018 composed by 4,443 port scales is used. Ship characteristics (Length overall, beam, draft, gross tonnage and deadweight tonnage) and weather conditions (waves, winds and sea-level) are present for every port scale. Then k-means algorithm is applied to identify 25 9-dimensional homogeneous clusters using the guided regression technique (see Camus et al. 2016).

The second step consist of validating the predictive tool. In this step the aim is validating the predictive tool of the towing service (number of tugboats to be used for port entry/exit, required pulling and engine power) for GENERAL CARGO's typology according to the individual characteristics of the vessel and the particular weather conditions in the operation. In this case, 747 port scales in 2019 are used to assess its accuracy. The success rate is higher than a 85%, although other relevant variables such as the state of conservation of the ship or port pilot knowledge are not included into the tool.

4. Prediction of the operability of the berthed vessels at the Las Palmas Port (Spain)

At berthing areas, the moored ship systems (ship-mooring lines-fenders) are subjected to different forcings, mainly those of harbor met-ocean climate (wind, waves, currents...). These forcings induce a dynamic response of the system (ship motions, tensions in mooring elements and compression in fenders). This system response is also conditioned by many other factors relative to the different actors involved (e.g., geometry/typology of berthing structures; type, loading condition and characteristics of ships; configuration and characteristics of mooring equipment and fenders...). As the system response increase, the efficiency and safety of port operations is progressively reduced. An excessive response leads to the complete cessation of operations (downtime) and even causes major damage and accidents.

It is a chain of processes with different agents and actors involved, leading to a concomitant and multidimensional interaction of the physical environment forcings with the different harbor structures, bathymetry, berthed ships and mooring/fenders equipment. For a complete understanding and accurate assessment of downtime, a numerical-statistical methodology is developed for a multi-process and multivariate characterization of port operability. A detailed description of the main sea-side processes is provided, allowing to relate the forcing agents with the corresponding system response, taking into account the site-specific characteristics, and all this finally linked to operability levels at berths. This methodology was developed and applied to the Africa basin (Las Palmas Port).

The methodology is based on an inference model based on semi-supervised Machine Learning techniques developed for predicting moored ship motions (Romano-Moreno et al., 2022). The highest performance of the proposed prediction model is demonstrated from a comparative analysis of different Artificial Intelligence techniques (multiple linear regression, gradient boosting, unsupervised k-means clustering, regression-guided k-means clustering, and artificial neural networks algorithms). In addition, the simplicity and robustness should be pointed out, compared to other more complex techniques, such as ANN. The analysis reveals the capabilities of the proposed model for use as an assistance tool for the management of berths and port operations in harbors. Figure 3 shows the coupling scheme of the predictive tool.

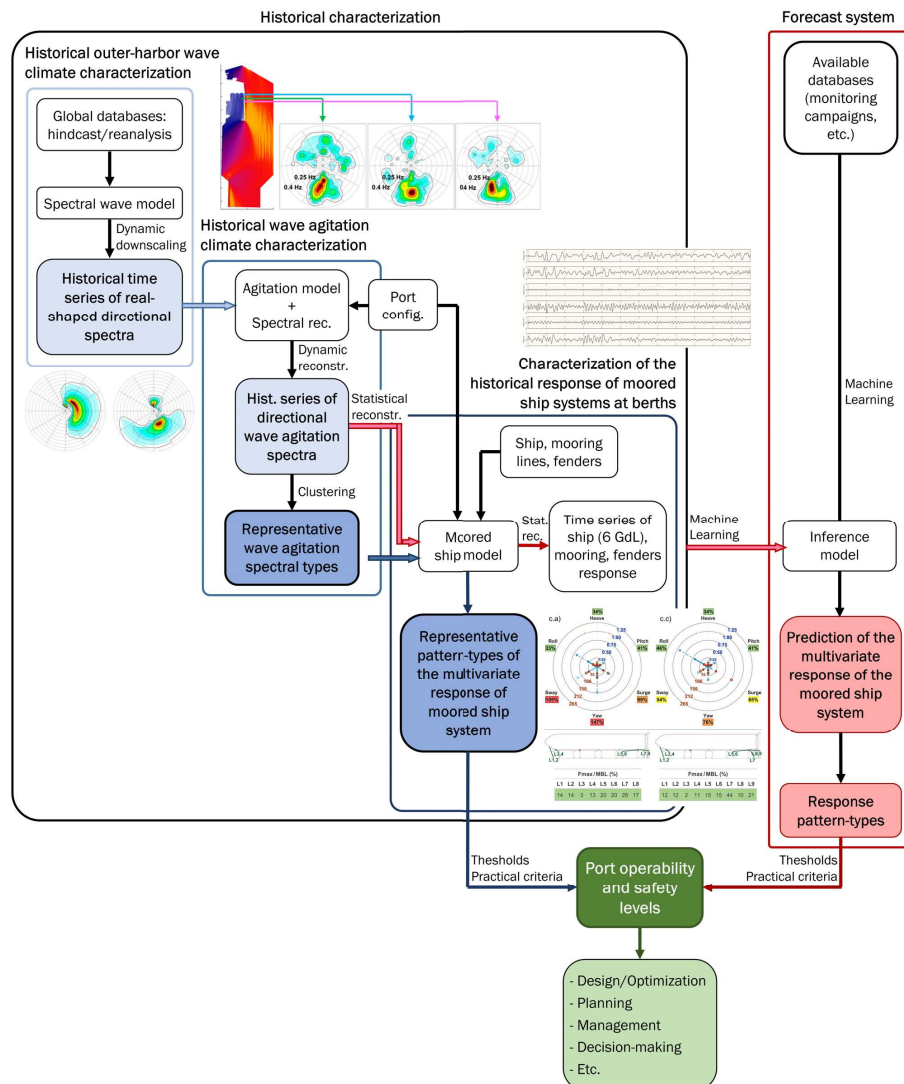


Figure 3: Methodological scheme. Historical characterization and prediction port operability and safety system.

5. Conclusions

Thanks to the applications of machine learning techniques, several projects, methodologies and tools were developed by IHCantabria to assist the design, construction and operation of port infrastructures.

Operational systems help the construction managers to optimize exploitation and construction costs and to achieve the individual deadlines of every activity related with the different tasks along the harbor, exposed to the met-ocean variables, and interacting with the unfinished harbor structures.

A novel climate hybrid modelling of wave events in a coastal site under different climate change scenarios is developed to downscale multi-model and multi-scenario offshore high-resolution climate change projections to local scale for evaluating climate change-induced impacts on ports.

A novel methodology has been developed for the characterization and modeling of the port tugging service by applying machine learning techniques. Specifically, the applied technique allows to answer to what are the tug service requirements, in terms of number of tugboats; required pulling and engine power; for a port scale arriving or leaving the port depending on the particular characteristics of the vessel and the weather conditions.

Important advances have been achieved for efficient and safe port operations thanks to the developed of a comprehensive characterization of port operability prediction of the berthed vessels.

6. References

Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I: Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4). pp 7649-7666. doi: 10.1029/98JC026222.

Camus, P., Méndez, F., Medina, R. (2011). A hybrid efficient method to downscale wave climate to coastal areas. *Coastal Engineering*, 58.

Camus, P., Rueda, A., Méndez, F.J., Losada, I.J., (2016). An atmospheric-to-marine synoptic classification for statistical downscaling marine climate. *Ocean Dyn.*, 66, 1589–1601.

Díaz-Hernández, G., Rodríguez Fernández, B., Romano-Moreno, E., Lara, J., 2021. An improved model for fast and reliable harbour wave agitation assessment. *Coast. Eng.* 170.

IPCC (2019). Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. In press.

Losada, I.J.; Lara, J.L.; Guanche, R.; Gonzalez-Ondina, J.M (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering*, ELSEVIER. Vol. 55(1), pp. 47-62

Romano-Moreno, E., Tomás, A., Díaz-Hernández, G., Lara, J.L., Molina, R., García Valdecasas, J. (2022) A Semi-Supervised Machine Learning Model to Forecast Movements of Moored Vessels. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1125.

Toimil, A., Losada, I., Nicholls, R., Dalrymple, R., Stive, M. (2020). Addressing the challenges of climate change risks and adaptation in coastal areas: A review. *Coastal Engineering*, 156.

Auteur principal : Gabriel Díaz-Hernández – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – diazg@unican.es - Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain
Co-auteurs : Raúl Cascajo Jiménez - Valenciaport, Ecological Transition - rcascajo.externo@valenciaport.com - Muelle del Grau, s/n, 46024, Valencia Spain
Delia Regueira Muñiz – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – delia.regueira@unican.es - Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain
Alejandro González Valle – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – alejandro.gonzalezv@unican.es – Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain
Beatriz Rodríguez Fernández – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – beatriz.rodriguez@unican.es - Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain
Eva Romano – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – eva.romano@unican.es - Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain
Antonio Tomás – IHCantabria - Instituto de Hidráulica Ambiental de la Universidad de Cantabria – antonio.tomas@unican.es - Avda. Isabel Torres, 15, Parque Científico y Tecnológico de Cantabria, 39011, Santander, Spain

Mots clés/Key words: port infrastructures, green energy, wave agitation forecast, wave energy

Développement d'un module de prédiction des vagues pour des opérations portuaires durables et la récupération d'énergi / Developing a wave prediction module for sustainable port operations and energy harvesting

Résumé de l'article: Le projet "ECCLIPSE (Évaluation du Changement Climatique dans les Ports du Sud-Ouest de l'Europe)", financé par le programme "Interreg-Sudoe" de l'UE, vise à améliorer la prévention des catastrophes, la gestion et la réhabilitation dans les zones sinistrées. L'Autorité Portuaire de Valence (APV) a proposé un module de prédiction de l'agitation pour les ports de Valence, Gandia et Sagunto, en accord avec le projet SAMOA-Agitación de Puertos del Estado en Espagne. Le module prévoit l'agitation des vagues à l'intérieur et à l'extérieur des ports, prévenant les dommages aux structures et les perturbations. Il calcule de manière novatrice les variables du potentiel énergétique des vagues pour les deux zones, en calculant les spectres de vagues omni-directionnelles et les données énergétiques. Cette technique identifie les directions, les fréquences et l'énergie des vagues, tout en reconnaissant les effets de réflexion / zones d'emplacement optimales pour la récupération de l'énergie des vagues. L'APV peut utiliser les prévisions opérationnelles pour les tests, l'ancrage de prototypes et la capture d'énergie respectueuse de l'environnement. Les avantages de proximité et d'infrastructure renforcent davantage l'utilisation par l'APV de l'environnement proche et des zones de bassin.

Article's abstract: The "ECCLIPSE (Evaluation of Climate Change in Ports of Southwest Europe)" Project, funded by the EU's "Interreg-Sudoe" program, aims to enhance disaster prevention, management, and rehabilitation in disaster zones. Port Authority of Valencia (APV) proposed a

predictive agitation module for Valencia, Gandia, and Sagunto ports, aligned with the SAMOA-Agitación project by Puertos del Estado in Spain. The module forecasts wave agitation within and outside ports, preventing damage to structures and disruptions. It innovatively computes wave energy potential variables for both zones, calculating omni-directional wave spectra and energy data. This technique identifies wave directions, frequencies, and energy, while recognizing reflection effects / optimal location zones for harvesting wave energy. APV can utilize operational forecasts for testing, prototype anchoring, and eco-friendly energy capture. Proximity and infrastructure advantages further APV's utilization of the near environment and basin areas.

1. Introduction and aims

In the context of the "ECCLIPSE (Evaluation of Climate Change in Ports of Southwest Europe)" Project, funded by the European Union through the "Interreg Sudoe" program, AXIS 4: Fight against climate change, OBJECTIVE 5B1: Improvement of coordination and effectiveness of prevention instruments, disaster management, and rehabilitation of disaster areas, the Port Authority of Valencia (hereinafter APV), proposed the development of an agitation climate / forecast model for the ports managed by APV (ports of Valencia, Gandia, and Sagunto). The objective was to extract relevant information from its results to prevent future situations that could cause damage to port infrastructures or hinder the normal development of operations conducted within them. This was done through the publication of the tender titled "DEVELOPMENT OF A MODULE FOR PREDICTING AGITATION WITHIN THE PORTS OF THE VALENCIA PORT AUTHORITY.". The contract for this project was awarded to the Institute of Environmental Hydraulics of the University of Cantabria, hereinafter referred to as IHCantabria.

The purpose of this study is to create a system capable of predicting wave-induced agitation conditions at various locations within the docks and/or piers of the ports mentioned above. Additionally, this application was created to estimate wave power and energy associated with the waves based on wave conditions both inside and outside the ports. This estimation can be relevant for the design of wave energy generation systems.

2. Background

Waves with oscillation periods of 1 to 30 seconds undergo transformations as they propagate from deep waters to coasts, influenced by bathymetry and topography. This process results in port agitation, affecting port operations such as mooring and loading. IHCantabria developed an analysis method for port agitation, used globally and customized to Spanish ports, comprising historical analysis and predictive approaches. A new variable proposed in this project is directional wave energy potential within agitation zones, relevant for APV's future management and wave energy harvesting designs. The operational tool is validated, integrated into CMA managed by Puertos del Estado, and SAPO-system for Port of Valencia. Generated information adheres to APV's technical requirements.

3. Methodology

Next, a general description of the individual tasks is provided:

3.1 Selection of the most suitable agitation model

Currently, numerical models based on elliptic mild slope equations are the most commonly used for this type of study. These models offer a practical and effective way to accurately evaluate port agitation, considering real bathymetric contours and complex bathymetries for irregular waves. These models are capable of solving linear processes such as refraction, diffraction, shoaling, and reflection (total and partial) as well as energy dissipation processes due to friction and wave breaking in a two-dimensional numerical domain. In this project, the use of the MSP port agitation model, developed by IHCantabria proposed. The MSP model solves the aforementioned elliptic mild slope equations using a finite element numerical scheme. The MSP model has been successfully employed (Díaz-Hernández, et al. 2021) in various research projects, consulting engagements, and technical support tasks from 2001 to the present date, delivering excellent results and highly competitive performance.

3.2 Bathymetric, port contour / typologies, instrumental data and forcing used

One of the fundamental and crucial tasks in the development of the operational agitation system, which paves the way for a proper setup of the numerical strategy, is related to the concept of data normalization. Instrumental data from field campaigns or permanent measurement networks of Puertos del Estado, originally provided in a free format (ASCII). Data regarding port section typologies that includes vital information about the various typologies that comprise the perimeters, structures, docks, and protective elements of each port. Spectral forcing data, obtained from previous numerical executions under the coverage of the regional SAPO system of the Puertos del Estado, these data provide spectral wave files in the pre-defined format of the SWAN wave propagation model. Data about the general port geometry, were aligned with the updated reality of each port facility. Bathymetric data standardized within a Geographic Information System (GIS) platform in native ArcGIS® formats defining the final port geometry (port perimeter) considered for each study port (Sagunto, Valencia, and Gandía), see Fig. 1.

3.3 Selection of Coastal/Port Contour Reflection Coefficients

In order to provide the most accurate and realistic response of port energy concerning the incoming and penetrating waves into the docks. This is why part of the work developed by IHCantabria in recent years has focused on understanding how classical agitation numerical models manage the reflection response of waves from inner and outer port contours. MSP model assess an appropriate and more realistic application of dynamic partial reflection coefficients. These coefficients are based on frequency variations of the incident waves that reach each contour-based on Vélchez et al. (2015, 2016) classification for 6 dike-family typologies to obtain a polynomial fit that ultimately defines the reflection coefficients based on the incident wave period. Thus, a unique function will be obtained for each typology (see Fig 1).

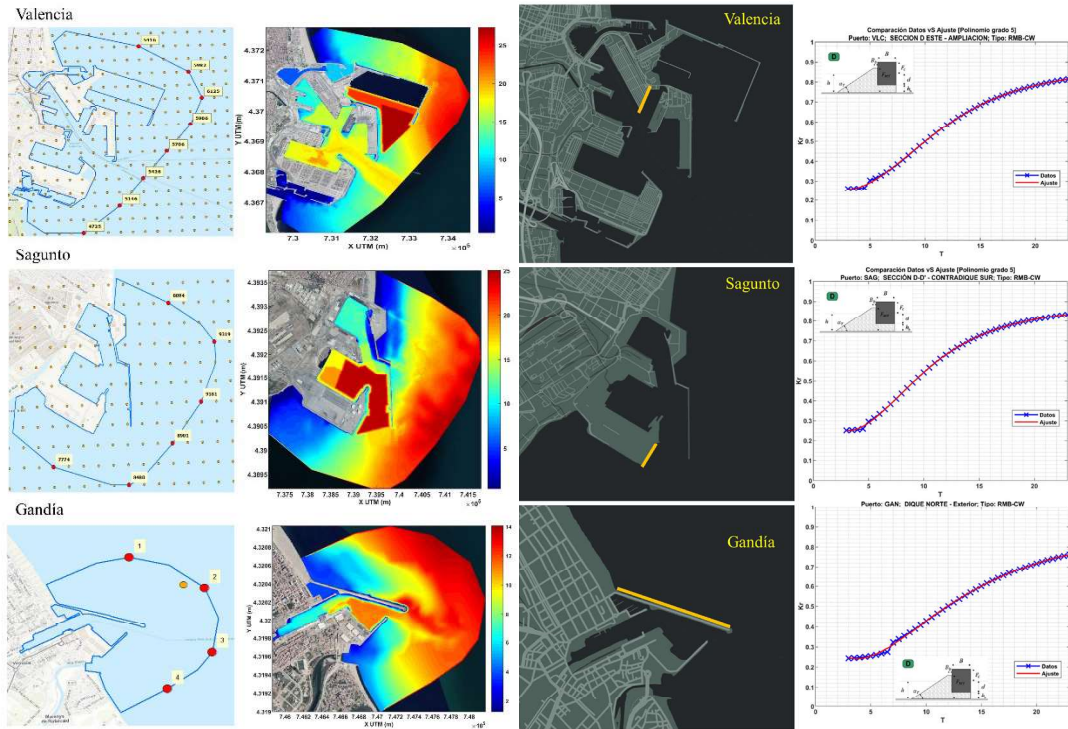


Figure 1: Valencia, Sagunto and Gandia ports. First row panels: numerical domain, and forcing locations, Second row panels: numerical mesh and bathymetry definition. Third and fourth row panels: Wave-Reflection coefficients (K_r) vs. Individual / incident wave period (T), for Valencia, Sagunto and Gandia Ports and for different breakwater / quay sections.

3.4 Design of the MSP numerical grid

The numerical domain must adhere to the constraints of the MSP model, the spatial dimensions of the study area, and the waves that will propagate within it, as discussed in previous sections. To define the MSP port contour, the topographic file provided by the APV will be used. On the other hand, to delimit the marine side of the execution domain, the MSP contour is completed with the line or polygon of wave generation, traditionally known as the "generation perimeter", where the tool introduces the irregular waves, taking into account the directional range of waves in the study area, so that the contour accommodates all of them. Furthermore, the criteria of numerical efficiency is acquired with the use of an adaptive mesh in triangular and unstructured finite elements. The mesh allows optimization of the resources required by the MSP model (CPU memory) since the nodes and elements of the finite element mesh adapt to the geometric contours of the port and corresponding bathymetric depths. This concentrates a higher number of elements in shallower areas of the domain (smaller wave periods) and relaxes the mesh for deeper areas (see Fig. 2). It is crucial to ensure that the generated mesh adequately evaluates the minimum wave period.

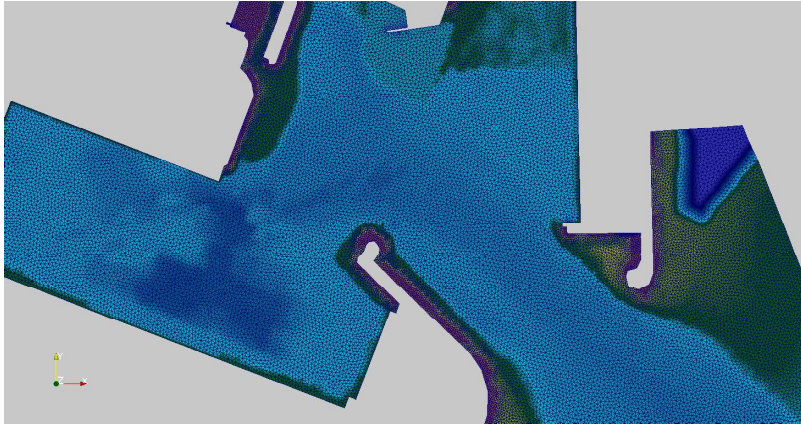


Figure 2 : Example (zoom) of the triangular and depth-adaptive mesh used for the MSP runs at Valencia Port.

3.5 Model runs and general results

MSP model run on the Linux system, allowing simulations to be conducted at the IHCantabria Supercomputing and Information Technologies Laboratory. This significantly alleviates the computational burden of the project. Specifically, the NEPTUNO node within the ALTAMIRA node of the University of Cantabria is employed, which is part of the Spanish Supercomputing Network. This node comprises 1296 cores with storage memory of 100TB and RAM of 5TB. Thanks to this supercomputing infrastructure, a monochromatic wave strategy can be expedited significantly, as they can be divided among different processors, thereby parallelizing the executions. For instance, for a large port like the Port of Valencia, with a catalogue of 528 monochromatic waves to be executed (x 3 repetitions based on tidal levels = 1584 monochromatic waves), the overall execution time can be reduced to a maximum of 3 days. This capability provided by the IHCantabria infrastructure is advantageous for any repetition of catalogues (geometry changes, validation and calibration work, etc.) typically carried out in the pre-numerical assembly phase of each port (see Fig. 3). Iterations (repetitions) are crucial during this phase to provide ultimate reliability to the operational agitation system. The results of each propagated case for each tidal level are stored in a general Hypermatrix for each port, containing significant wave height (H_{m0}), peak wave period (T_p) and wave energy potential (P_w) at any location of the entire numerical domain, for all the monochromatic runs and water levels. These catalogues of monochromatic waves will be used to reconstruct the spectra predicted by SAPO and obtain the spectral map of H_s across the entire domain. These pre-run agitation catalogues were provided to the client in Python 3.5 format for direct implementation into their operations and Environmental Management Dashboard (CMA). Also, analogous matrices are obtained for the free surface and phase, which will be used for the directional wave decomposition for each variable for waves and energy potential.

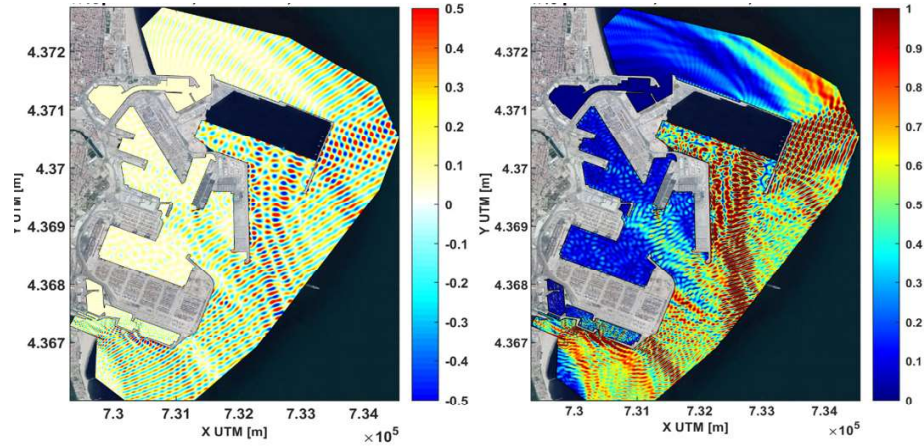


Figure 3 : Example of one monochromatic wave run at Valencia Port. Free surface (left panel) and Wave height (right panel), for a $H=0.25$ m, $T=11$ s and $Dir=150^\circ N$.

3.6 Pre-Operational validation and system calibration

Using the spectral reconstruction codes, the pre-operational validation of the system and calibration, if necessary, were performed. The purpose is to assess the quality of the results produced by the developed wave and agitation operational system in each port before its implementation by Puertos del Estado. To achieve this, the developed codes were executed for dates when coincident wave data are available at the study port (SAPO system input for the MSP model, to be provided by Puertos del Estado), along with in-situ instrumental data from coastal buoys and radar tide gauges of Puertos del Estado. The goals of this validation process are twofold: a) to comprehend the functionality of the numerical wave propagation and port agitation system, the discrepancies it introduces compared to reality, and potential errors that might arise, and b) to recalibrate the results within the generated MSP numerical grids. This recalibration aims to refine the originally considered reflection coefficients (an iterative process), if necessary. The numerical system's validation were performed using classic statistical parameters (BIAS, RMSE, SI, CORR, and R2), generated by comparing two similar datasets from different sources (scatter plots illustrating instrumental vs. numerical prediction comparison, see Fig. 4). This task quantified the predictive capability of the agitation model and concurrently identify weaknesses that contribute to divergent predictions, potential errors in the numerical setup, or disparities in the bathymetric and geometric information of each port compared to the physical reality of the problem.

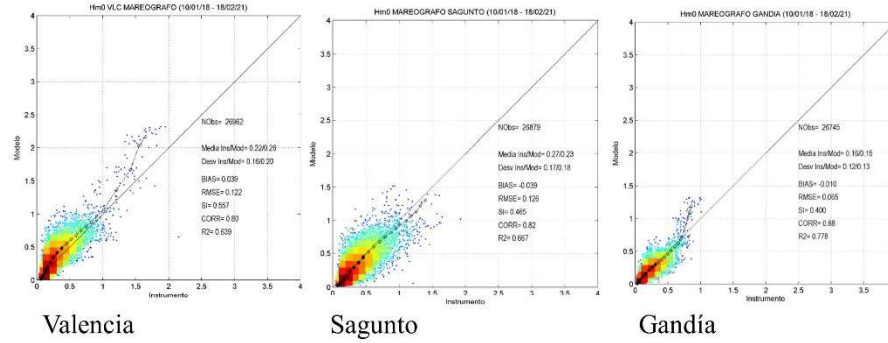


Figure 4 : Final validation of Hm0 values at Valencia, Sagunto and Gandía Ports. .

3.7 Post-Processing

The system was included within a WEB-bases Graphical User Interface (GUI), able to provide the following visualizations: i. Hourly agitation prediction maps for the next 72 hours for Hs. ii. Hourly time series of Hs, Tp, and Pw at specific points of interest (pre-selected and agreed upon with APV for each study port). iii. Ocean-meteorological prediction reports featuring agitation maps across the port domain and time series of Hs, Tp, Pw at points of interest, iv. Directional wave disaggregation. And v. Generation of hourly energy potential maps with a minimum period of one year.

For the calculation of directional energy potential (Pw), the method uses a sea state hourly represented by its directional energy spectrum $S(\omega, \theta)$, which means the temporal energy flux given by the following expression, integrating energy fluxes from all components of the spectrum:

$$w = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} c_g(\omega, z) S(\omega, \theta) d\omega d\theta \quad \text{Equation 1}$$

$$c_g = \frac{c}{2} \left(1 + \frac{2kz}{\sinh(2kz)} \right) \quad \text{Equation 2}$$

where :

ρ is the density of seawater, $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$

g is the acceleration due to gravity, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$S(\omega, \theta)$ is the directional energy spectrum representing the energy density (energy per unit area) assigned to each frequency ω and direction θ of the sea state.

$C_g(\omega, z)$ is the group celerity representing the propagation velocity of wave energy, calculated by:

c is the wave celerity, $c = L/T = \omega/k$

ω is the angular frequency of the wave, $\omega = 2\pi/T$

k is the wave number, $k = 2\pi/L$

T is the wave period

L is the wavelength

z is the water depth (positive distance from the surface to the seabed)

Angular frequency, wave number, and depth are related by the dispersion relation:

$$\omega^2 = gk \tanh(kz) \quad \text{Equation 3}$$

For cases where the directional spectrum associated with the sea state is not available, wave power can be determined using spectral parameters representative of the sea state (obtained directly through the spectral reconstruction method developed by IHCantabria and implemented in Puertos del Estado's operations), as follows:

$$Pw = \frac{1}{8} \rho g Hm0^2 c_g(\omega, z) \quad \text{Equation 4}$$

where the moment of order n of the energy spectrum is:

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \omega^n S(\omega, \theta) d\omega d\theta; n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{Equation 5}$$

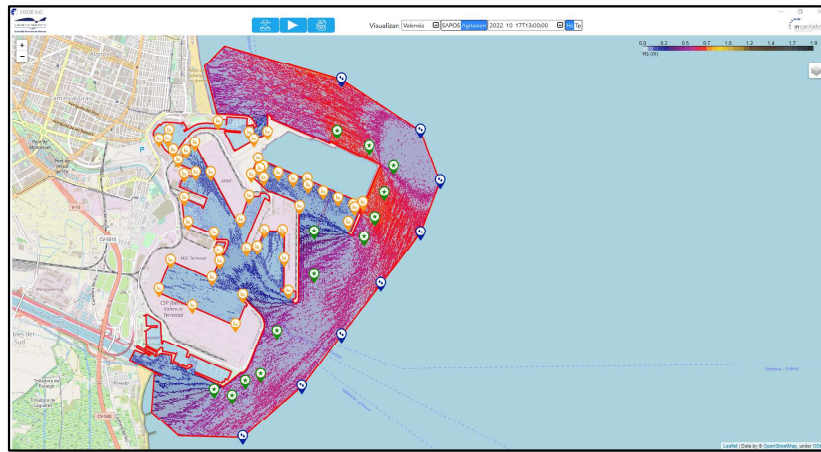


Figure 5 : GUI main screen for wave agitation and wave potential energy forecast, example for Valencia Port.

4. Conclusion and future perspectives

Currently, achieving widespread affordable electricity generated from wave energy is considered of high ecological importance. The current technique proposes the conceptualization, construction, use, and exploitation of the so-called Wave Energy Converters (WECs). In addition, this new energy paradigm holds significant social value due to several integrated features:

- It represents a sustainable and inexhaustible energy source that could contribute significantly to the mix of renewable energies. Increasing the quantity and diversity of renewable energy sources is highly beneficial, as it enhances availability and reduces the reliance on fossil fuels.
- Electricity derived from wave energy will enhance countries' energy self-sufficiency.

- It will contribute to the creation of a new sector that fosters innovation and employment.

Given the continuous increase in global energy demands alongside the depletion of fossil fuel reserves, wave energy is gaining considerable importance. For the proper design and conceptualization of future WEC devices, the variable known as wave energy potential is crucial. This variable, directly dependent on wave characteristics at the system's future installation point, must be thoroughly characterized and explicitly described in terms of frequency and direction.

Considering the points mentioned above, it is expected that the wave prediction system in the port environment will allow for high-level calculation of wave energy potential. This integration will encompass the most relevant physical processes of wave transformation and propagation, providing a spatial-temporal numerical experimentation field that accurately defines the future of WEC solutions under the auspices and management of APV.

5. References

G. Diaz-Hernandez, B. Rodríguez Fernández, E. Romano-Moreno et al., An improved model for fast and reliable harbour wave agitation assessment. *Coastal Engineering*, Volume 170, 2021, 104011, ISSN 0378-3839, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2021.104011>.

Vílchez, M., Clavero, M., & Losada, M. A. (2015). “Operational behaviour of a 2D breakwater: Synthesis and design performance curves”. Report EM 200. Instituto Interuniversitario de Investigación del Sistema Tierra en Andalucía. Sede CEAMA. Universidad de Granada.

Vílchez, M., Clavero, M., & Losada, M. A. (2016). “Hydraulic performance of different non-overtopped breakwaters types under 2D wave attack”, *Coastal Engineering*, Volume 107, January 2016, Pages 34-52.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC

Med days

25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)

25th until 27th of October 2023 in the city of

Sète (region Occitanie)

Ref. Author:

Diogo Oliveira – University of Aveiro, R5 Marine Solutions– diogoo21@ua.pt
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

Co-authors:

André Cardoso – R5 Marine Solutions – andrecardoso@r5engineers.com
Caroline Ferreira – R5 Marine Solutions – carolineferreira@r5engineers.com
Márcia Lima – R5 Marine Solutions – marcialima@r5engineers.com
Avenida Dr. Lourenço Peixinho, 6, 3800-164 Aveiro, Portugal
Carlos Couto – University of Aveiro – ccouto@ua.pt
Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

Keywords: Coastal structures, breakwater, BIM, Dynamo, Revit, damage analysis.

BIM methodology applied to maritime works.

Abstract

BIM technology has become increasingly important in engineering, providing tridimensional models fed with information that allow better visualization and understanding of projects and any clash/conflict situation between different specialties, allowing a far more cohesive site/project coordination. In this work, different types and shapes of coastal structures were studied, as well as distinct layouts of the blocks of the armour layer. The programming platform used was Dynamo which is integrated with Revit. These powerful softwares integrated within Revit offer many advantages to engineers when used together to create efficient and accurate BIM models. The custom automation of complex workflows helps reduce errors and save time. Firstly, a tool was built to automate the execution of these models according to the desired characteristics in each situation. This tool allows the quick build of the 3D model on each project, which has the advantage of testing and visualizing different solutions to prevent errors, estimate costs and quantities and make better decisions. In the second part of this project, the concept was to use the developed tool for existing breakwaters and evaluate the need for reinforcement of the armour layer. Models were intersected with the topographies and bathymetry of the existing structures, which permits the comparison of the theoretical surface of the armour layer and the existing surface. The placing of the blocks according to the topography and bathymetry was also automated for this case bringing an advantage to the execution of rehabilitation projects. This type of tool helps the development of BIM models, which also have several benefits in maritime works. The implementation of this method for project construction was successfully tested on some models, and the possibility to create and test multiple solutions in a short period is a great advantage in understanding and choosing the better solution for maritime works. In the future, this method can be extended to similar structures with different shapes and different type of blocks.

Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC
Med days
25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)

Introduction

BIM (Building Information Model) technology is constantly developing, assuming extreme importance in architecture and engineering through three-dimensional parametric models (Tavares, 2014). This technology can be defined as the digital representation of the physical and functional characteristics of an object, which constitutes a reliable basis for decision-making and facilitating design, construction, and operation processes (Azhar, 2012). The information contained in these models (Figure 1) allows a better visualization, understanding, and management of projects and helps to detect possible conflict situations between different specialties, allowing a more cohesive project coordination (Tavares, 2019).

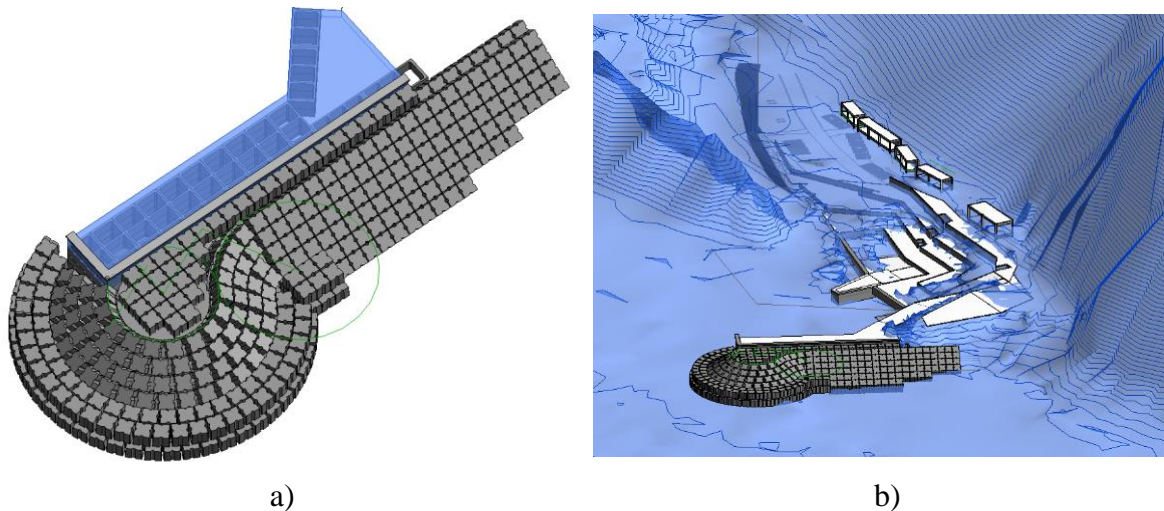


Figure 1: a) BIM model of a breakwater with Antifer blocks; b) BIM model with all project elements.

In this work, different types and shapes of coastal defense structures were studied, as well as the arrangement of the blocks of the resistant layer (Oliveira, 2023). This work is essentially based on slope breakwaters, but the tools developed can be optimized for new types of structures. The programming software used was Dynamo, which is integrated with Autodesk Revit, a BIM modeling software. These powerful pieces of software offer numerous advantages to designers when used together to create efficient and accurate BIM models. The customized automation of complex workflows allows multiple solutions to be created accurately in a short space of time. This makes it easier to choose the best solution and reduces possible design errors. For the part of the work on damage analysis of coastal structures and reconstruction of BIM models using point clouds, it was used Autodesk ReCap software and some Python programs were created to pre-process the point clouds obtained through topo bathymetric surveys.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC **Med days** **25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)** **25th until 27th of October 2023 in the city of** **Sète (region Occitanie)**

Automated breakwater model in BIM

In the first phase, a tool was built to automate the BIM construction of a model of a breakwater with slopes, with the distribution of the Antifer blocks that make up the resistant mantle. Breakwaters are generally large structures used to protect areas with strong sea waves and create shelter areas to facilitate navigation and port operations. Slope breakwaters, generally made up of agglomerated blocks with a slope, allow waves to be absorbed totally or partially.

When designing a breakwater, it is necessary to consider the various phenomena in the coastal zone. There may be several reasons for building a breakwater, so its dimensions and shape must meet these conditions. The main factor influencing the size and shape of the structure is sea waves. It is also extremely important in port projects to consider the characteristics of the navigation channel according to the type of ships and the configuration of the seabed. Navigation channels are sized according to the size of the ships, often requiring dredging or other maintenance procedures.

During this project, the Antifer blocks were initially parameterized in Revit software (Figure 2a) according to the established design formulas (Freitas, 2005). In addition, manual modeling was also carried out in AutoCAD to understand the three-dimensional modeling methods, essentially in the arrangement of the Antifer blocks in the resistant mantle, but also in other elements such as the breakwater core and the walls and slabs at the top of the structure. Several solutions were built with different types of geometry where it was possible to see the biggest conflict areas, such as the junction between the head and the trunk of the breakwater. Subsequently, the geometry of the structure was optimized and block spacing formulas were applied.

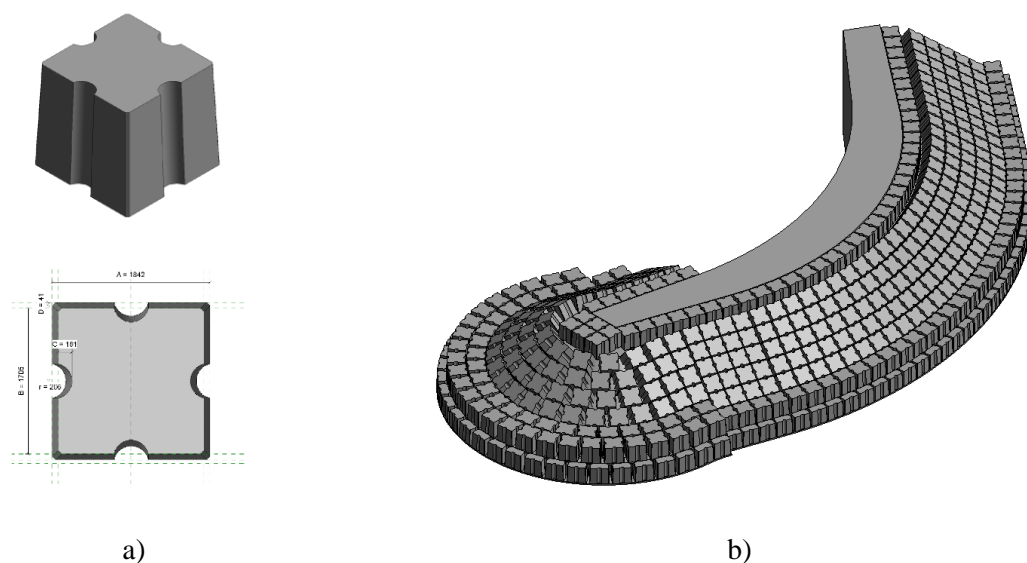


Figure 2: a) Antifer block parametrization; b) 3D model of a breakwater with Antifer blocks.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC **Med days** **25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)** **25th until 27th of October 2023 in the city of** **Sète (region Occitanie)**

After making all these models in AutoCAD and Revit software, we began to automate the process of building a breakwater in Dynamo. The tools developed require the insertion of certain input parameters according to the characteristics of the project, while the interactive tool allows certain parameters to be altered and adjusted to study the best final solution. It should be noted that the tool allows the construction of a breakwater model for most of the geometries used, from curved, straight or mixed breakwaters, with one or two slopes. In addition, it is possible to define the characteristics of the Antifer block in each of the breakwater zones, in the head zone, it is possible to change the radius and position of the center as well as the number of blocks on the slope and berms, their slopes, among other parameters.

This tool is constantly being improved and allows the 3D model (Figure 2b) to be built quickly and accurately according to the parameters defined in each situation, allowing different solutions to be tested and visualized to minimize possible errors. In the new versions of this tool, the sub-layers were modeled and the calculation for adjusting the number of blocks to the existing terrain at the construction site has been added, as well as the excavation required to support the blocks. These new improvements allow to obtain the volumes of all the elements used in the BIM project and make it easier to estimate the quantities and respective costs (Figure 3, Table 1). With all the automation of this process, it is possible to test multiple solutions and make the right choices.

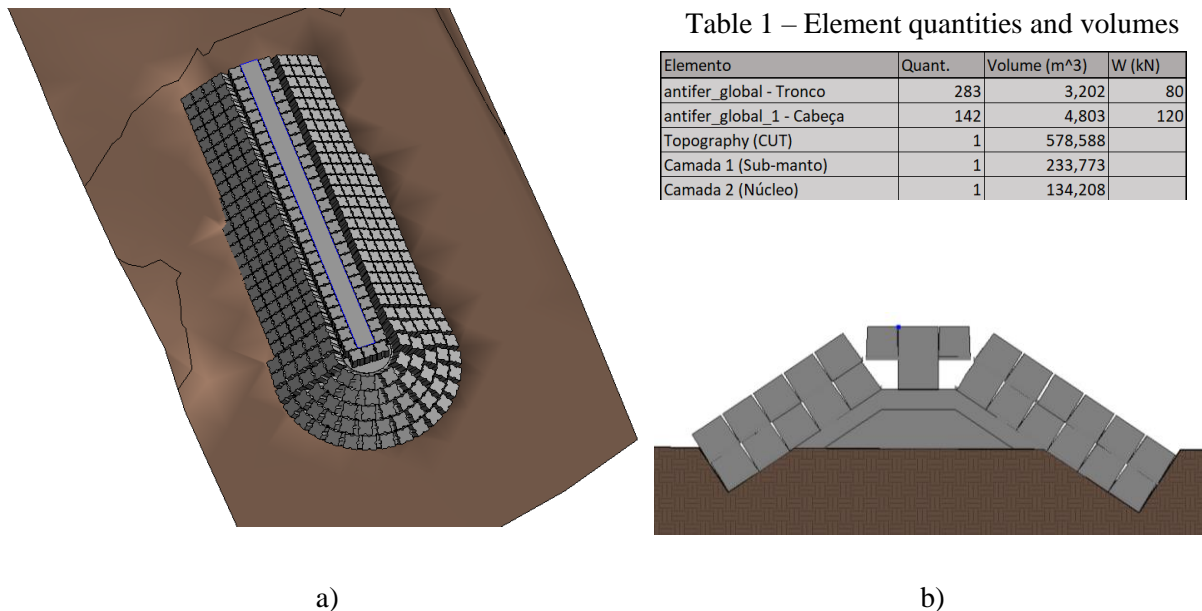


Figure 3: a) BIM model of the breakwater including the topography intersection; b) Section view of the breakwater with Antifer blocks, sub-layers and intersection of the existent terrain.



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days 25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie) 25th until 27th of October 2023 in the city of Sète (region Occitanie)

Damage model of maritime structures in BIM

Over time, through maritime agitation or even more adverse events such as storms, the damage to coastal structures needs to be surveyed and assessed. For a damage analysis of these structures, in the second part of this project was used the previous tool to calculate the theoretical design model. Comparing this model and the existent terrain in possible to assess the degree of damage in the structures allowing the construction of damage maps and the need of reinforcement on the resistant layer.

This methodology consists of intersecting the theoretical surface calculated with the tool developed previously with the real surface. To obtain the coordinates of the existing elements on site, top-bathymetric surveys of the resistant layer are generally used. Depending on the quality and accuracy of these surveys, the calculation in the Dynamo software can be adjusted by adding maximum and minimum damage parameters relative to the height of the antifer block used at the site. By comparing surfaces, it is possible to obtain a damage map using this tool, illustrating the areas where reinforcement with new blocks is required (Figure 4).

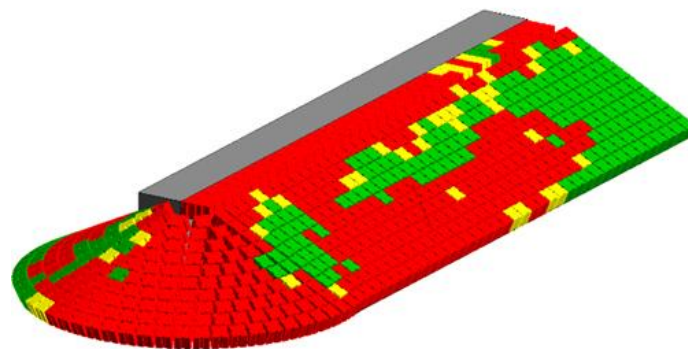


Figure 4: Damage map of the existing structure.

Subsequently, in these areas, the program developed automatically adjusts the new blocks inserted to the height of the corresponding site, thus achieving a real final reinforcement solution bringing multiple advantages to the execution of rehabilitation or reconstruction projects (Figure 5).

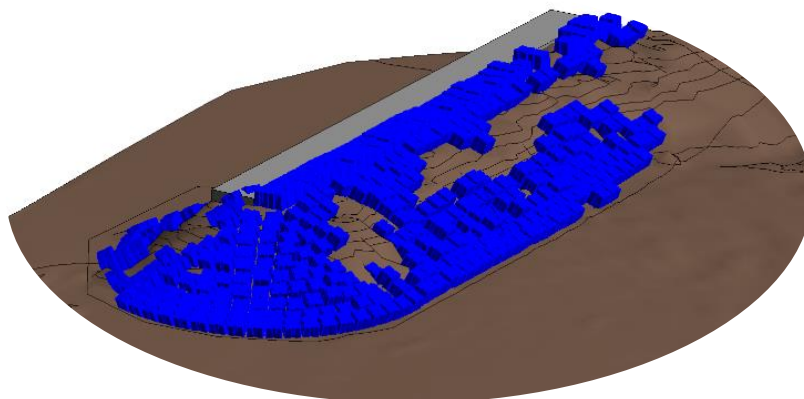


Figure 5: Antifer reinforcement solution



Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC Med days 25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie) 25th until 27th of October 2023 in the city of Sète (region Occitanie)

Automatic block recognition through high-resolution topo-bathymetric surveys

Given the need to identify and recognize the existing elements of a coastal structure and for subsequent rehabilitation or reconstruction, the opportunity arose to develop a tool that automatically develops three-dimensional BIM models from high-resolution top-bathymetric surveys. This additional tool will also enable a comparison between theoretical and existing models.

Thus, based on high-resolution top-bathymetric surveys carried out with high-tech sensors, the point clouds of existing structures were pre-processed in Python to recognize the Antifer blocks. With the methodology developed, it is possible to collect the positions and orientations of each block, and with this data reproduce a BIM model to make a comparison with the original design and identify areas of the structure where there is a rupture or a decrease in stability (Figure 6).

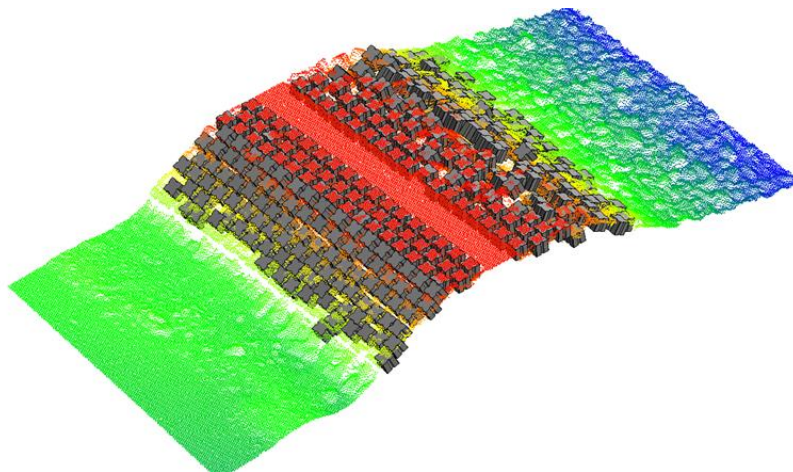


Figure 6: Automatic block recognition through high-resolution top-bathymetric surveys

Conclusion

This type of tool aids the development of BIM projects, usually for civil works, but also with many benefits for maritime works. The implementation of this method on projects has been successfully tested on several models, and the possibility of creating and testing several solutions in a short space of time is a great asset for comparing and optimizing different solutions for maritime works.

In the future, all these methodologies could be adapted to similar structures with different shapes and different types of blocks. As for damage analysis in this and other types of structures, the tools developed can be adapted and improved, for example with better survey resolutions and including color parameters for better identification of existing elements.



**Journées Méditerranéennes de l'AIPCN/PIANC
Med days
25 au 27 octobre 2023 à Sète (Occitanie)
25th until 27th of October 2023 in the city of
Sète (region Occitanie)**

Referências Bibliográficas

- Azhar, S. (2012). M. Khalfan e T. Maqsood. «Building Information Modeling (BIM):Now and beyond».
- Freitas, P. (2005). «Hydraulic stability of antifer block armour layers Physical model study». Em: *Department of Civil Engineering, IST, Technical University of Lisbon*.
- Moreira, P. (2018). «Integração do BIM na Gestão de Projetos de Edifícios». Em: *Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro*.
- Oliveira, D., Cardoso, A., Couto, C., Lima, M. and Cerda, F. (2023) «Metodologia BIM aplicada a obras marítimas» Em: 11as Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária, Porto de Leixões.
- Tavares, E. (2019). «Gestão do Património Edificado com Recurso ao BIM». Em: *Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro*.
- Tavares, R., Stengel, J. e Schultmann, F. (2014). «Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs». *Automation in Construction* 38



Auteur principal : Nechache– Akli – Akli.Nechache@ lem-dz.com – Laboratoire d’Etudes Maritimes – Djenane El Malik, Hydra, Alger – Algérie

Co-auteurs : Hadji – Meriem – meriem.hadji@ lem-dz.com – Laboratoire d’Etudes Maritimes – Djenane El Malik, Hydra, Alger – Algérie

Mots clés : appontement, minéralier, grue sur rail, tablier à poutres, précontraintes

Keywords: wharf, ore carrier ship, rail crane, girder beam, prestressed

Titre: Proposition d’une solution alternative de tablier à poutres précontraintes pour la conception d’un appontement de minéralier du port de Jenjen, Jijel, Algérie

Résumé:

Cet article présente le projet d’appontement de minéralier du port de Jenjen. Cet appontement est conçu initialement par douze (12) caissons verticaux circulaires de 22,84m de diamètre et d’une largeur de plateforme de 25m. Mis à part les forces d’accostage et d’amarrage, sismiques, etc..., il reçoit une surcharge d’exploitation de grue estimée à 1080 tonnes réparties sur une longueur de 20ml sur chaque rail.

Dans le but de baisser le montant de réalisation de ce projet, nous proposons une solution économique d’un appontement composé de neuf (09) caissons verticaux rectangulaires de dimensions 23ml de largeur x 18ml de longueur et de huit (08) tabliers à poutres préfabriquées en béton précontraintes de 16m de longueur, appuyées sur ces caissons. La solution proposée fera l’objet d’une analyse détaillée aux états limites de service et ultime pour la durée de vie de l’ouvrage conformément aux normes techniques en vigueur.

Title: A proposed alternative solution of prestressed girder beam to design an ore carrier ship wharf of the port of Jenjen, Jijel, Algeria

Abstract:

This paper presents the ore carrier wharf project of the port of Jenjen. This wharf is initially designed by twelve (12) vertical circular caissons of 22.84m diameter and with a platform width of 25m. Apart from the forces of berthing and mooring, seismic, etc., it receives a crane operating overload estimated at 1080 tons distributed over a length of 20ml on each rail.

In order to downwards the amount of realization of this project, we propose an economic solution of a wharf composed by nine (09) rectangular vertical caissons of dimensions 23ml

in width x 18ml in length and eight (08) prestressed concrete girder of 16m length supported to these caissons. The proposed solution will be subject to a detailed analysis in the serviceability and ultimate limit states for the lifetime of the structure in accordance to the applied technical standards.

1. Introduction

L'appontement qui a été conçu initialement par douze (12) caissons verticaux circulaires de 22,84m de diamètre et d'une largeur de plateforme de 25m [1], a été modifié afin de réduire le nombre de caissons à mettre en place. Cette modification consiste à remplacer quelques caissons existant dans l'étude initiale par des tabliers à poutres précontraintes par post tension et ce dans le but de baisser le montant de réalisation du projet.

Pour ce faire, nous proposons une solution économique d'un appontement composé de neuf (09) caissons verticaux rectangulaires de dimensions 23ml de largeur x 18ml de longueur et de huit (08) tabliers à poutres préfabriquées en béton précontraintes par post tension de 16m de longueur, appuyées sur ces caissons.

Cet appontement doit supporter la surcharge d'exploitation de grue estimée à 1080 tonnes réparties sur une longueur de 20ml sur chaque rail aux états limites de service et ultime conformément aux Eurocodes 0 et 1 [2] et ce pour la durée de vie de l'ouvrage.

L'analyse de la capacité du tablier tient compte, en outre, du retrait et du fluage du béton (time dependent analysis) tiré de l'Eurocode 2-2004 [3]. Elle se fera à l'aide du logiciel CSI Bridge [4].

2. Modélisation et résultats

2.1 Modélisation et calcul

Afin de mener cette étude nous avons modélisé le tablier à poutre précontrainte tel que défini ci-après :

Le tablier d'une largeur de 25m est composé de 08 poutres isostatiques en forme de T de longueur 16ml fabriquées en béton précontraint par posttension. Les poutres ont une hauteur de 1,5m, espacées de 2,93 m et surmontées d'une dalle en béton armé d'épaisseur de 60 cm.

Les deux poutres de rive sont menues de 09 câbles de précontrainte de 15T15S quant aux six poutres intermédiaires, elles sont menues de 05 câbles de 15T15S.

L'exécution du tablier suit les phasages de construction suivantes :

1^{ère} phase : mise en tension de 03 câbles.

2^{ème} phase : Stockage de 60 jours.

3^{ème} phase : mise en tension des câbles restants pour toutes les poutres.

- 4^{ème} phase : mise en place sur tablier.
 5^{ème} phase : mise en œuvre de la dalle.
 6^{ème} phase : mise en œuvre de l'étanchéité et de l'enrobé sur la partie centrale et mise en place des rails aux droits des poutres de rive.
 7^{ème} phase : fluage jusqu'à une durée de 10 000 jours.
 8^{ème} phase : appliquer les surcharges.

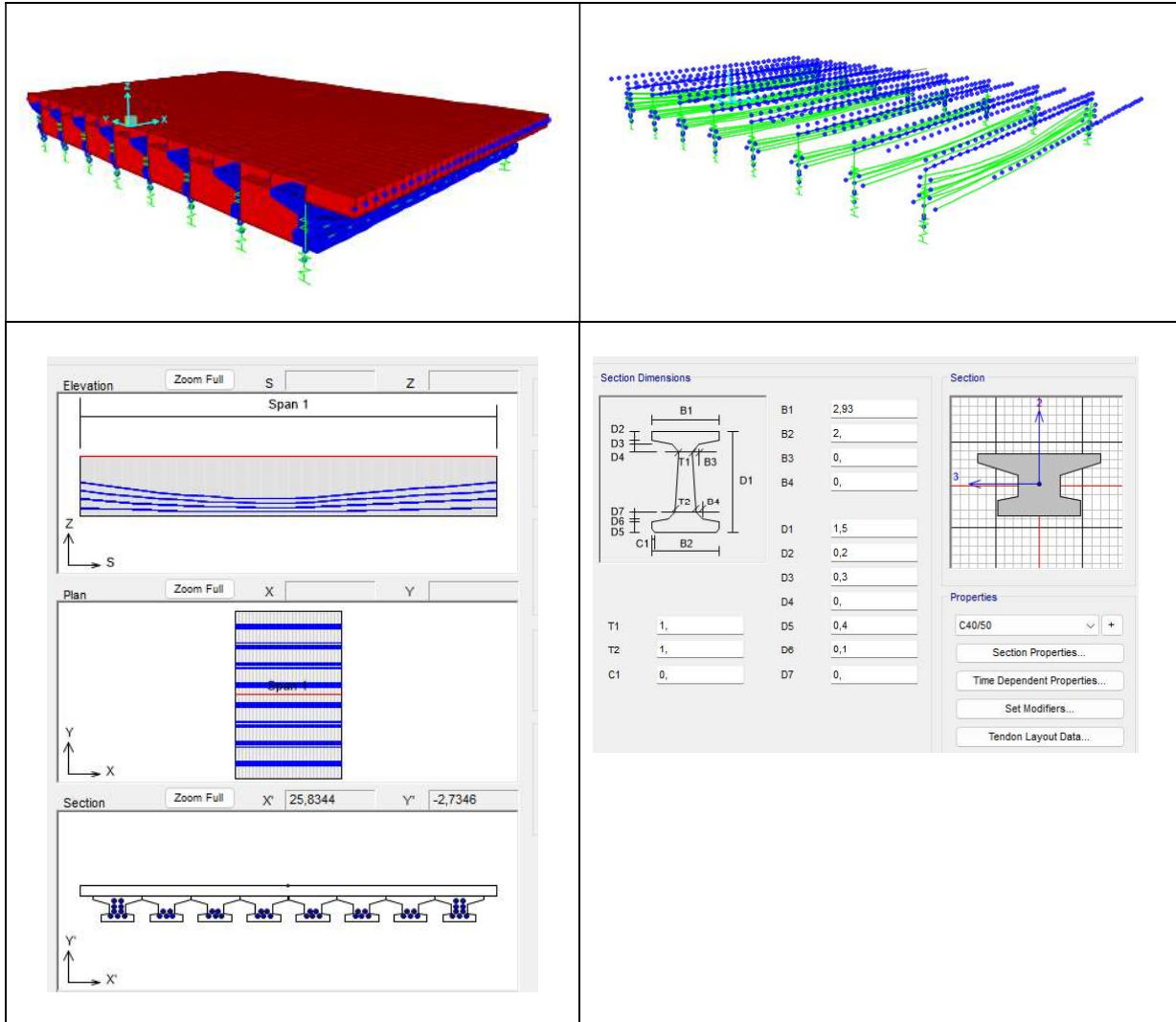


Figure 1 : Modèle de tablier à poutres précontraintes

2.1.2 Caractéristiques des matériaux

Béton :

Tableau 1 : Caractéristiques du béton

Élément	Résistance béton	Classe d'exposition	Fck en éprouvette cylindrique
Dalle tablier et diaphragme	C40/50	XS3	$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$
Poutres précontraintes	C40/50	XS3	$f_{ck} = 40 \text{ MPa}$

Les conditions relatives à la classe d'exposition du tablier à poutre, fonction des conditions d'environnement, ont été définies en conformité aux spécifications de la norme NF EN1991-1-1 où sont définies les classes d'exposition environnementales.

Acier :

Acier haute adhérence pour des armatures : B 500 B $f_y = 500 \text{ MPa}$

Acier actif poutre précontrainte : Y1860S7 $f_{p,k} = 1860 \text{ MPa}$

Les aciers de précontraints adoptés pour les poutres sont des torons standards T15 SUPER.

Limite de rupture garantie $f_{prg} = 1860 \text{ MPa}$

Limite élastique garantie $f_{peg} = 1600 \text{ MPa}$

Module d'élasticité $E_s = 195\,000 \text{ MPa}$

Section du toron : $A_p = 150 \text{ mm}^2$ (0.6''S correspondant à T15 super, diamètre nominal = 15.7mm)

Les aciers ont une très basse relaxation TBR $\Rightarrow \rho_{1000} = 2.5 \%$

2.1.3 Modèle de fluage et retrait de béton

Le modèle de fluage et retrait de béton C40/50 selon l'Eurocode 2-2004 est défini ci-après :

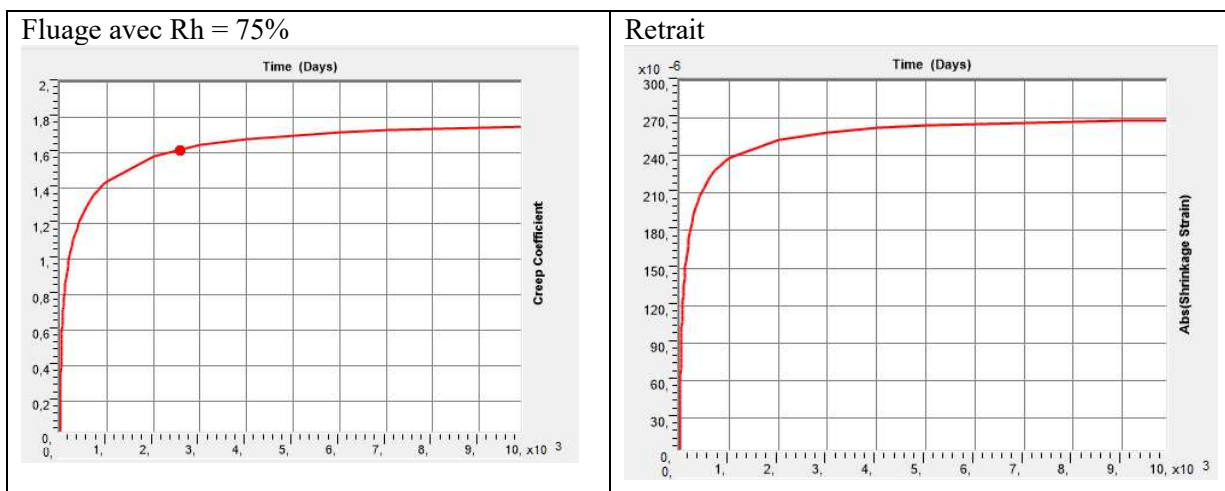


Figure 2 : Courbe de fluage et de retrait de béton C40/50

2.1.4 Charges et surcharges

Les charges et les surcharges considérées dans cette analyse est celles correspondants aux poids propres, les charges mortes, les charges thermiques, entres autres, les surcharges d'exploitation et de minéralier :

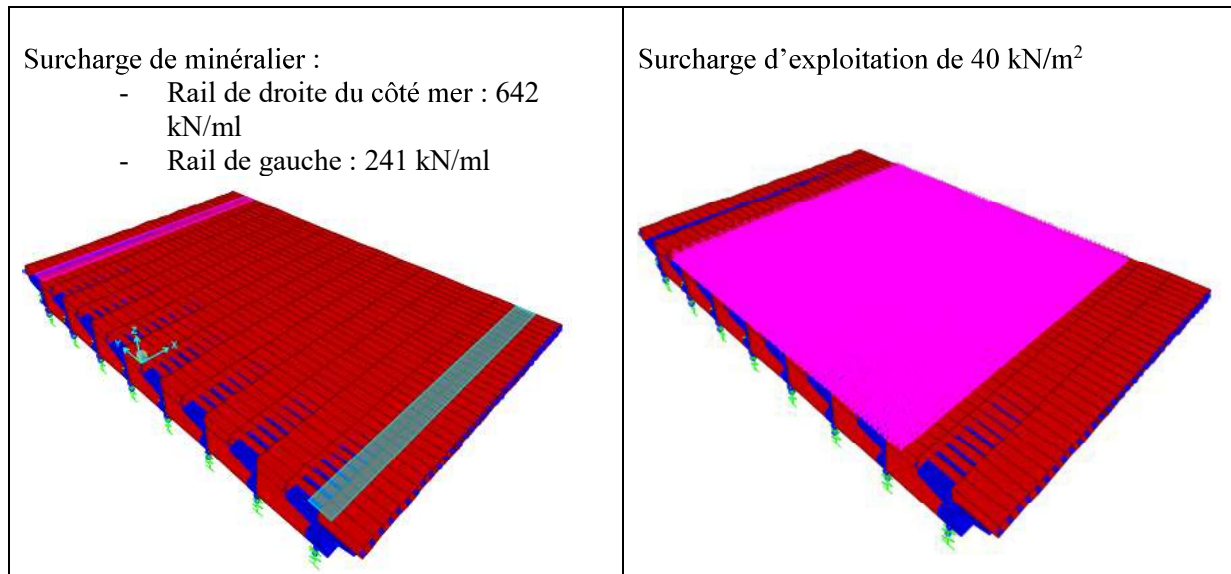


Figure 3 : surcharge de minéralier et routière

2.1.5 Combinaisons d'actions

Les combinaisons d'action ont été établi en suivant la norme Eurocode 0 et 1 [2].

2.2 Résultats et interprétation

Les résultats concernent principalement la vérification du tablier sous différentes combinaisons d'action en états limite de service fréquent, quasi-permanent et rare.

La vérification doit répondre aux exigences de l'Eurocode 2 [3].

2.2.1 Résultats

En premier lieu nous évaluons la perte de précontrainte en phase de construction à savoir en considérant un temps de fluage de béton de 10 000 jours.

La précontrainte initiale est égale à $0.8f_{prg} = 1488 \text{ mPa}$ équivalent en force de 3348 kN par câble de 15T15S.

A noter que la contrainte dans le béton engendrer dans la poutre seule est d'environ $0,36 \times f_{c28} = 14,40 \text{ mPa}$.

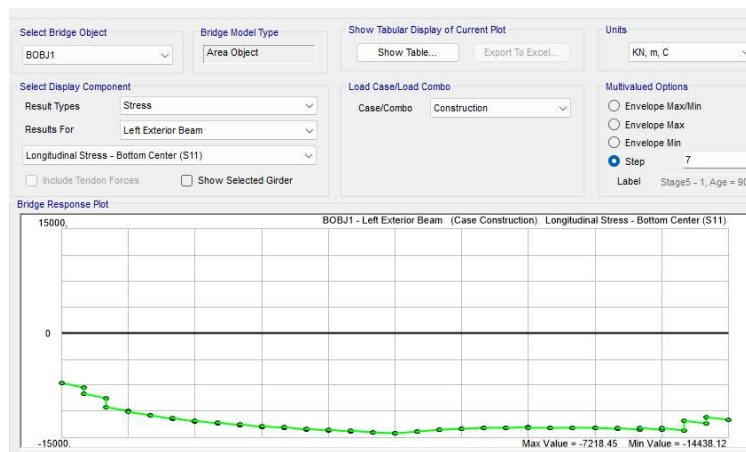


Figure 4 : Contrainte de compression dans la poutre

La perte de précontrainte est évalué à : $(3348-2161)/3348 \times 100 = 35.45\%$ après 10 000 jours de fluage de béton.

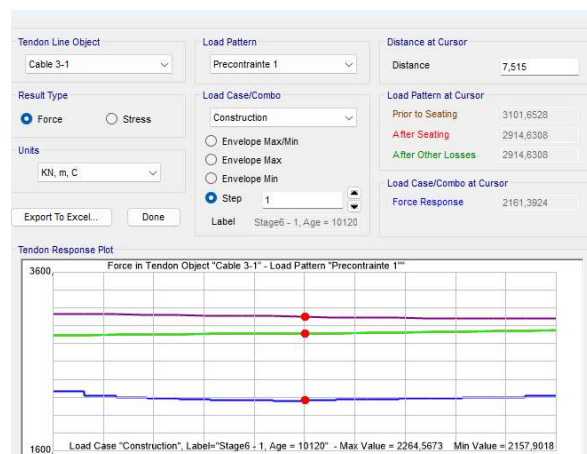


Figure 5 : perte de précontrainte a la phase finale après 10 000 jours de fluage

La vérification des contraintes sous différentes combinaison à l'ELS sont données ci-après :

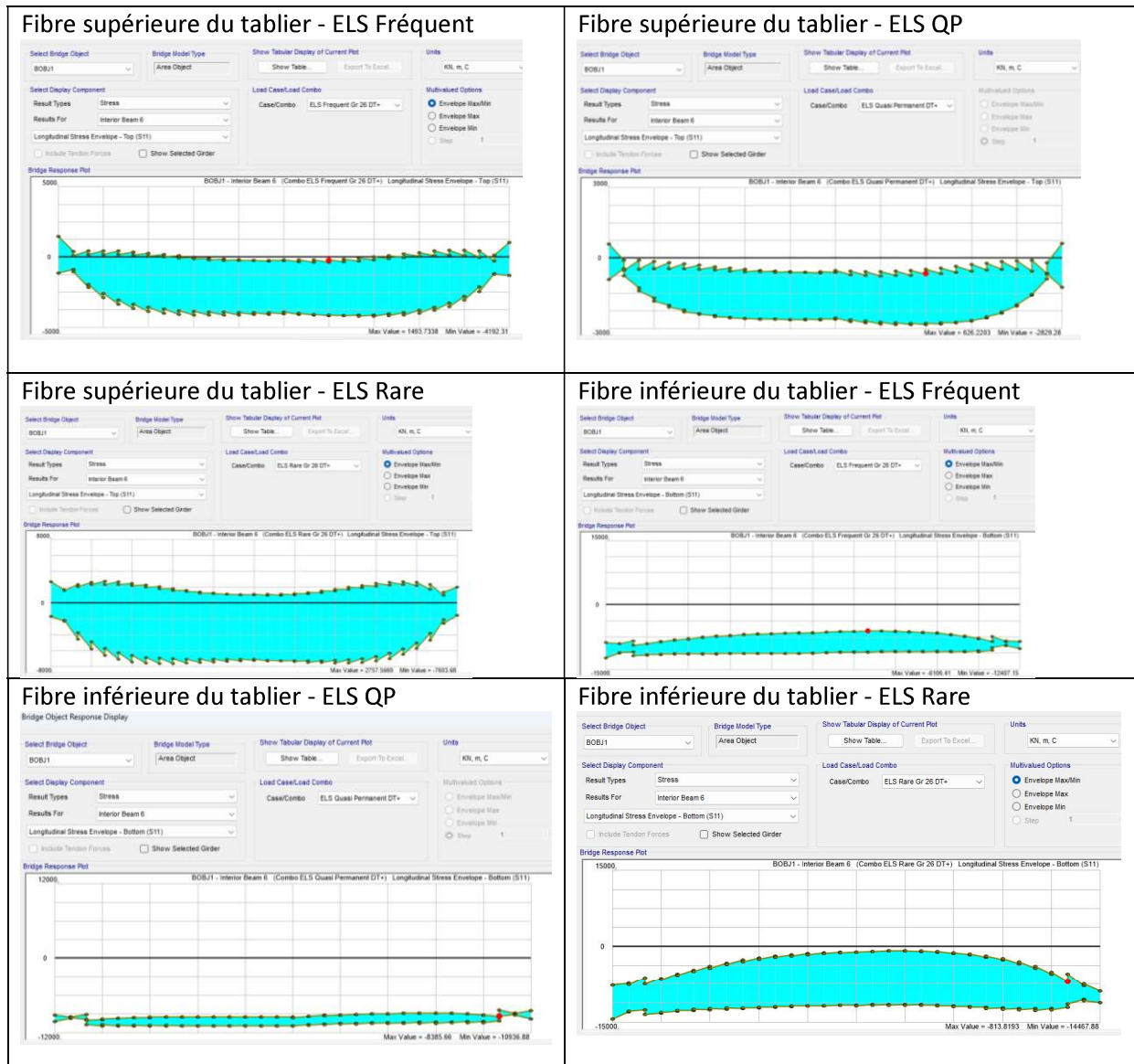


Figure 6 : Distribution de contrainte le long du tablier sous différentes combinaisons d'action aux états limite de service

2.2.2 Interprétations

Nous constatons que les contraintes sur la fibre inférieure, le long de la poutre, sous différente combinaisons d'actions demeurent en compression. Ce qui nous ramène à dire que la vérification de la précontrainte est mené en classe 1, conformément aux exigences relatives aux ouvrages stratégiques.

La vérification de l'état limite ultime du tablier sous combinaison ELU fondamentale se fera en introduisant entre autres les armatures passives longitudinales et les armatures d'effort tranchant.

La conception d'un appontement en combinant 08 tabliers et 09 caissons rectangulaires est nettement plus économique en la comparant à un appontement avec 12 caissons circulaires et tablier en béton armé pour joindre les parties évidées entre cylindres. L'économie s'élève de l'ordre de 20%.

3. Conclusion et perspectives

Une conception d'un appontement composé de 09 caissons rectangulaires et 08 tabliers à poutres précontraintes par post tension a été élaboré dans le but de comparer les prix de construction par rapport à un appontement composé de 12 caissons cylindriques placé en mer dans le port de jen-jen, en Algérie.

D'après l'étude menée dans cet article, nous avons observé l'effet du fluage-retrait du béton sur les pertes de précontrainte. La prise en compte de cet effet dans la conception de tel structure en béton précontraint est très importante sachant qu'il représente le paramètre prédominant qui permettra de concevoir des structures qui dure dans le temps moyennant, entre autres, un traitement de surface avec une peinture époxydique et un entretien périodique.

Il a été aussi observé que cette conception permettra d'économiser environ 20% sur le prix de construction par rapport à celui conçu avec des caissons cylindriques.

Bibliographie :

[1] : Projet d'appontement du port de jen-jen avec douze caissons cylindriques.

[2] : Base de calcul des structures selon l'Eurocode 0 et 1

[3] : Eurocode 2 calcul des structures en béton

[4] : Logiciel CSI Bridge



Auteur principal: Neltner, Moritz | mneltner@danfoss.com | Danfoss Power Solutions GmbH & Co. OHG Krokamp 35, 24539 Neumunster, Germany
Co-auteurs: Mohr, Andreas | andreas.mohr@tuhh.de | Hamburg University of Technology Am Schwarzenberg-Campus 4 – 21073 Hamburg, Germany
Jahn, Carlos | carlos.jahn@tuhh.de – Hamburg University of Technology Am Schwarzenberg-Campus 4 – 21073 Hamburg, Germany
Bynum, Ian | ian.bynum@danfoss.com | Danfoss Innovation Accelerator, CIC, 245 Main St, Cambridge, MA 02142, USA

Key words: Forecast, Container Handling Equipment, GHG Regulations

Impact of GHG Regulations at Container Terminals on the Container Handling Equipment Market

Résumé de l'article : Les émissions de gaz à effet de serre du transport maritime constituent une part significative des émissions liées au transport. Contrairement aux émissions provenant des navires, celles des terminaux à conteneurs ne sont pas réglementées par des entités mondiales. Cette absence de réglementation globale entraîne une diversité d'ambitions individuelles, souvent non contraignantes, de la part des exploitants de terminaux, des autorités portuaires et des gouvernements locaux. La fragmentation des efforts rend difficile l'évaluation du potentiel de réduction des émissions combiné des réglementations et engagements individuels. De plus, l'impact sur la demande en solutions technologiques reste incertain. Comprendre cette demande aide à orienter les efforts de développement et à assurer une capacité de production suffisante pour atteindre les objectifs de réduction des émissions. Afin de saisir les efforts actuels et leur impact, les réglementations sur les émissions et les objectifs volontaires de réduction des émissions affectant les équipements de manutention des conteneurs ont été rassemblés. Ces données peuvent servir de point de départ pour une analyse plus approfondie des stratégies de réduction des émissions efficaces. En associant les objectifs de réduction des émissions à la capacité de manutention actuelle dans les terminaux à conteneurs concernés et aux projections de développement du marché, la taille du marché des équipements de manutention de conteneurs sans émissions est estimée. Le modèle prédit qu'en 2030, 250 millions de TEU, soit environ 24 % de la capacité de manutention mondiale, seront traités par des équipements sans émissions. Les engagements de réduction des émissions sont principalement formulés par les exploitants de terminaux privés et les autorités portuaires. Seules quelques réglementations gouvernementales touchent les émissions de la manutention des conteneurs. Comparées aux prédictions de l'initiative Science Based Targets pour le secteur maritime, les cibles actuelles de réduction des émissions ne suffisent pas pour maintenir le réchauffement climatique en dessous de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels. Par conséquent, si les gouvernements souhaitent limiter le réchauffement global à 1,5 °C, ils doivent prendre des mesures supplémentaires et exiger la réduction des émissions de gaz à effet de serre provenant des terminaux à conteneurs.

Article's abstract: Greenhouse gas emissions from maritime transport represent a significant share of transport related emissions. In contrast to emissions from ships, emissions from container terminals are not subject to regulations issued by global entities. The lack of global regulation results in a variety of individual ambitions of often non-binding nature by terminal operators, port authorities and local governments. The fragmentation leads to difficulties determining the demand for technological solutions. Knowing the demand helps to guide development efforts and ensures sufficient production capacity is created to meet emission reduction targets. To understand present efforts and their impact, emission regulations and voluntary emission reduction targets affecting container handling equipment have been collected. The collected data may serve as a starting point into further analysis of effective emission reduction strategies. Combining the emission reduction targets with current handling capacity at affected container terminals and market development projections, the size of the emission-free container handling equipment market is estimated. The model predicts that in 2030, 250 million TEU, roughly 24 % of global handling capacity, will be handled by emission-free equipment. The commitments to reduce emissions are predominantly issued by private terminal operators and port authorities. Only a few governmental regulations affect emissions from container handling. Compared with the predictions for the maritime sector by the Science Based Targets initiative, current emissions reduction targets are not sufficient to meet the level necessary to keep global warming below 1.5 °C above pre-industrial levels. Therefore, if governments want to limit global warming to 1.5 °C, they need to take more actions and force the reduction of greenhouse gas emissions from container terminals.

1 Introduction

Ports worldwide have acknowledged their significant impact on the environment and have started to take action to reduce their greenhouse gas (GHG) emissions [1]. In ports a huge share of emissions has its origin in container terminals (CT). In CTs, the biggest GHG producers are container handling equipment (CHE). Different strategies to reduce CHE's GHG emissions, using a variety of different reporting standards and focusing on different sources and technological solutions, have emerged [2]. While GHG emissions from ships are regulated through the International Maritime Organization (IMO), no global regulations for landside operations exists [3]. This leads to a variety of local and global actors defining individual regulations and goals. Current research is focused on comparing and analyzing the impact of the different emission reduction pathways. This research is important because it ensures that emission reduction strategies have a significant impact and effective strategies are known to a wide range of actors. However, the current research neglects to analyze the effect on the demand of emission-free technology. It is important to know when and how much emission-free CHE will be required, to ensure enough development effort is committed to the respective technologies. For this reason, the objective of this work is to create an overview of current GHG regulations and company strategies affecting CHE at CTs. Furthermore, it aims to understand the state of the CHE market and derive its likely development caused by beforementioned regulations and strategies. In the end, following research questions have to be answered:

R 1 Which regulations and strategies require emission-free CHE?

R 2 How will the demand for emission-free CHE be affected by these regulations and strategies?

2 Method

The model of the emission-free CHE market incorporates two aspects, published statements, promotions, regulatory documents, planned investments and mandates to reduce GHG emissions, collectively referred to as strategic objectives, and a general growth prediction of the CHE market. The impact of strategic objectives is determined by combining the results with CHE fleet data of CTs which was predominantly sourced from terminal operators and port authorities. The market growth prediction up to 2030 is based on Global Trade Analytics Suit (GTAS) Forecasting [4] and International Transport Forum [5] onwards.

Collection of Zero-Emission Objectives. The structured review loosely follows the guidelines described by Garius et al. [50] for a multivocal literature review. And is split into three steps: (1) Source collection, (2) quality assessment and (3) data extraction. The source collection itself was divided into two steps. First, entry points were defined, then links from the entry points to other initiatives were followed similar to the snowballing concept used in [6]. This approach was deemed suitable as sharing actions to reduce GHG emissions has inherent value and as a result, initiatives are often connected. For example, global initiatives are often comprised of smaller local efforts. These local efforts in turn might contribute to a variety of larger initiatives.

To acquire a diverse set of entry points, they were gathered from three sources. The first source are important actors in the shipping industry as listed in Drewry's Global Container Terminal Operators [7] and major shipping nations as listed by the United Nations Conference on Trade and Development [8]. A dedicated search for initiatives of these actors was augmented with Google search results for terms related to emission-free container handling. Lastly, initiatives showcased in industry newsletters were used. In a second step, the quality of the sources was assessed and sources with an insufficient quality removed. The quality assessment was based on factors increasing the likelihood that the plans of an initiative succeed, like objectives being published by an entity that has agency over the CHE fleet, concrete implementation steps being published, and progress being demonstrated. For example, while it is likely that regulatory requirements will be met fully, it is less likely that emission reduction goals which are not accompanied by concrete implementation steps will be fulfilled. The categories are regulatory requirement, specific strategy, vague strategy, promotion and planned. For the last two categories, not only the fulfilment of an objective is uncertain but also what the final objective will be. To enable detailed forecasting of the demand of emission-free CHE the relevant emission reduction key characteristics were extracted from the initiatives. Besides the quality assessment, issuer and affected terminals, also the goal, timeline and scope were recorded. An exemplary objective is an 80 % reduction in direct carbon dioxide (CO_{2e}) emissions from RTGs by 2030.

Emission-Free CHE Market Forecast. The market forecast for emissions-free CHE is based on the collected strategic objectives aiming to reduce GHG emissions from CHE, CHE fleet data and forecasts for the growth of the container shipping market. In its essence, the model determines the size of the emission-free CHE market for a given year by mapping the strategic objectives to the affected fleet and accounting for the overall market growth. In the following, three key steps are outlined. Details can be found in [9].

First, the CHE fleet data is pre-processed. In this step missing capacity data for CTs is calculated based on simple models using equipment information and already emission-free CHE subtracted to avoid conversion of already emission-free CHE. Furthermore, the expected container shipping market growth is

incorporated. The main step is the mapping of the strategic objectives to the non-emission-free CHE fleet. Individual terminals may be covered by overlapping objectives, i.e., objectives from the terminal operator might differ from the objectives of the local government. For every year and CT, the most ambitious goal is used. While some objectives only affect certain CHE types, others affect the whole fleet. Besides requirements for individual CHE types, a required emission-free container handling capacity for each terminal is calculated, because for many CTs no detailed CHE fleet information was available. For simplicity, it was assumed that progress towards the objectives is linear and objectives affecting multiple CHE types are distributed evenly onto the types. Finally, the data is aggregated by year, location, quality and issuer. This allows the analysis of the emission-free CHE market growth along the dimensions of location, time and issuer while keeping the quality assessment in mind.

3 State of the Art

Impact of CHE on GHG Emissions. Compared to GHG emissions generated by ships, emissions generated by CHE are relatively small. For example, in Long Beach, USA, CHE is accountable for 12 % of total GHG emissions produced by cargo transport activities. Focusing on CT operations, CHE is responsible for 79 % of GHG emissions [10]. Similarly, in Valencia, Spain CHE is responsible for 81 % of GHG emissions from landside operations [11]. Hence, CHE is the main contributor to GHG emissions from landside operations.

Through these examples it becomes clear that the majority of GHG emissions are emitted by vessels. Thus, it is reasonable that a substantial share of maritime emission regulations focus on ship emissions. However, because the majority of landside emissions are emitted by CHE, the transition to zero-emission port operations will also require significant changes to the current CHE fleet. Especially considering that worldwide most CHE vehicles are still diesel-powered nowadays [12].

Emission-free CHE. CHE is considered emission-free when it does not produce direct GHG emissions by a combusting engine. Nevertheless, emission-free CHE can still produce particular matter, noise, or light emissions, e.g. through tires [13]. Furthermore, operating zero-emission CHE can still produce substantial amounts of indirect GHG emissions if the power source, like electricity or hydrogen, is produced in emission intensive processes.

Several examples show that the hurdle to zero scope 1 emissions in CTs is not of technical nature. For example, HHLA CT Altenwerder plans to operate a completely electrified AGV fleet from this year and initiates the electrification of landside operation as well [14]. However, analysis show that full electrification is not yet possible for e. g. straddle carrier, reach stacker or top handler [15, 16]. Hence, the application of fully electrified CHE on a specific CT depends, once adoption is technically and financially feasible, on factors like the operating mode, the utilization of the CHE, the infrastructure [16, 17]. As most CT employ dedicated CHE, the CHE market is closely linked to the number of containers handled. Emission-free CHE still represents a minority of the overall CHE used. Thus, the emission-free market has growth potential even if the overall CHE and container shipping market are constant. Nevertheless, an increase in the overall CHE market is expected to have a positive influence on the emission-free CHE market.

Emission Regulations. A thorough overview of current and future regulations is necessary to give ports the possibility to adjust their development plans according with the described targets and optimize future regulations and targets. Furthermore, summarizing and raising awareness of ambitious emission reduction goals might lead other parties to commit to similar goals. At the moment international public and

private organizations like IMO or ESPO, local actors like port authorities or collectives, or individual companies like terminal operators initiate emission reduction regulations.

IMO and ESPO have recognized the climate change impact of the maritime transport [1, 18], and have introduced measures to reduce GHG emissions into their strategic plans. Most of these measures target ship emission instead of port emissions [18]. The next update on IMO's GHG strategy is scheduled for mid-2023 [19]. The regulation controlling carbon efficiency of ships and their operations entered into force at the start of 2023 [20]. According to the Science Based Targets initiative (SBTi) [21] the IMOs emission regulations are not suited to keep emission below the 1.5° C target. Other international emission-reduction facilitators are the Green Shipping Challenge [22] and the World Ports Sustainability Program [23]. Other organizations like Ports for People evaluate emission reduction strategies and provide guidance on the decarbonization path [24].

In the context of maritime transport, emissions not only play a global role but a further local role as emissions by ships and heavy equipment at port pose a direct health risk when inhaled. Therefore, countries and local governments introduced emission standards. For example, CHE in California needs to comply with the TIER 4 off-road emission standard [25]. To support companies, financial incentives are used to accelerate the adoption of zero- or low-emission CHE [26]. The ports of Vancouver, Seattle and Tacoma consolidate their efforts and understanding the relevant objectives to develop the Northwest Ports Clean Air Strategy [27].

4 Results & Discussion

The collected strategic objectives have a global reach with most objectives being issued by terminal operators followed by port authorities as seen in fig. 1. No current legally binding regulations have been found during the review. Even the objectives posed by city governments are formulated as goals and not regulations. As large parts of the effort are driven by global terminal operators the potential impact does not focus on specific geographic regions. The strategic objectives issued by terminal operators tend to be less concrete than the objectives published by port authorities. Therefore, the actual effort might be lower than promoted.

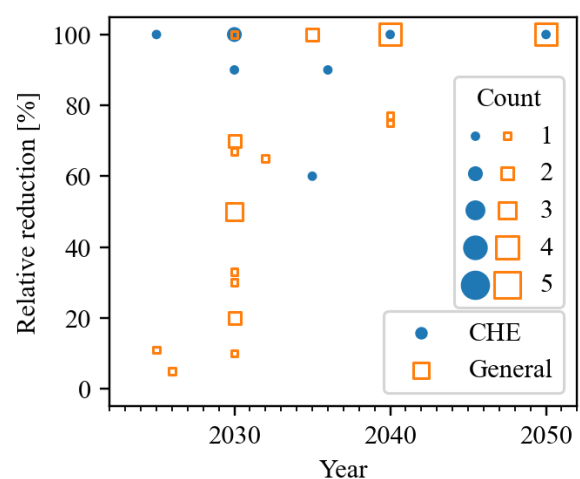
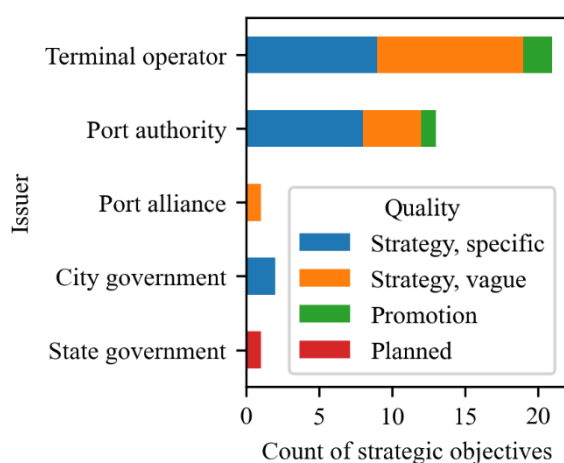


Fig. 1. Count of strategic objective by type and issuer Fig. 2. Development of strategic objectives over time

In general, the goals become more ambitious as time goes on with many initiatives targeting the years 2030, 2040 and 2050 as can be seen in fig. 2. Strategic objectives which only affect CHE opposed to

general CT emissions tend to be more ambitious and short term. This could indicate that issuers see a concrete path to reduce emissions from CHE. Over 90 % of the strategic objectives use 2019 or later as a base year, highlighting the acuteness of the topic.

Most strategic objectives do not focus on particular CHE types and CHE type specific fleet information is only available at less than 30 CTs. Therefore, the analysis of demand for emission-free CHE is performed on a capacity basis. For example, reducing the CO₂e emissions of a current CHE fleet handling 1.000 TEU by 30 % may be achieved by replacing 30 % of each CHE type by an emission-free alternative. This corresponds to an emission-free handling capacity of 300 TEU.

The forecast of the container handling capacity which needs to be emission-free to meet the strategic objectives is shown in fig. 3. For comparison, the worldwide handled capacity and capacity of the terminals included in the utilized data base are shown. The highest conversion rate can be seen before 2030, i.e., emission-free CHE needs to become widely available in the next seven years. After 2040 the emission-free capacity is almost parallel to the growth of the referenced CHE fleet data base. This means that no further existing CHE is converted and new CHE is procured to match the current emission-free CHE market share. To achieve this, emission-free CHE needs to be widely available and total costs of ownership of emission-free CHE might be below that of traditional CHE. In this scenario it could be expected that the share of emission-free CHE rises faster than predicted by the model.

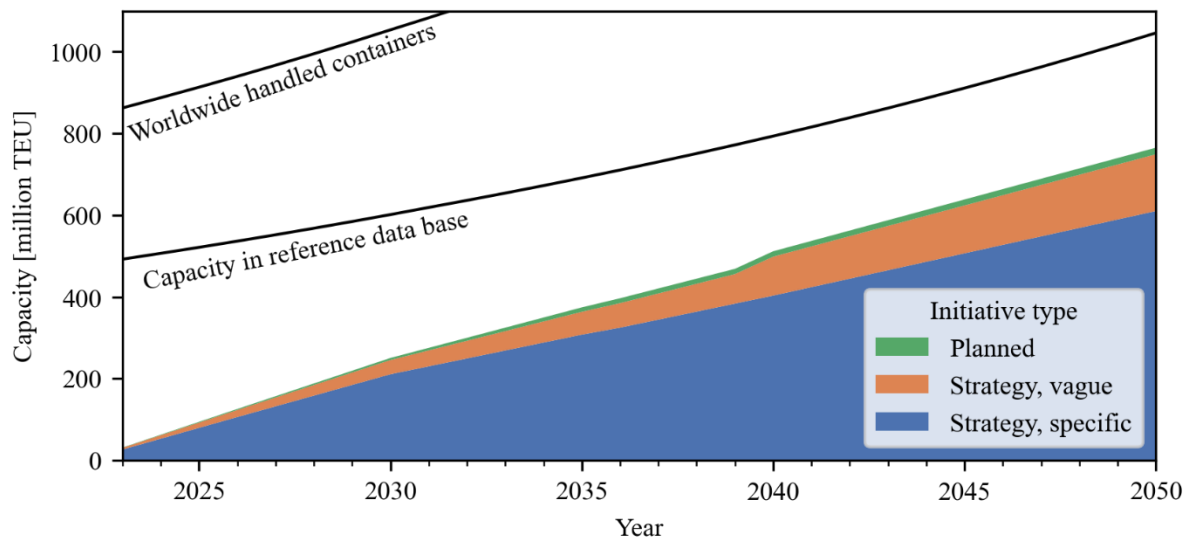


Fig. 3. Demand forecast for emission free container handling capacity

A large part of the forecasted demand is driven by the two big terminal operator's PSA International and APM Terminals. They control a significant part of the global CHE fleet and have set ambitious emission reduction goals [28, 29]. Due to the high share of these two actors, the predictions are sensitive to changes in their respective strategic objectives. The sensitivity to individual actors can also be seen by the jump in 2040. The jump is caused by the misalignment between DP World's year-over-year [30] and their 2040 emission goal [31].

To compare the ambitions expressed in the strategic objectives with the actions required to limit global warming to 1.5 °C above pre-industrial levels, the global share of containers handled by emission-free CHE is considered. The model predicts that 24 % of the global containers handled in 2030 and 37 % in 2040 are handled by emission-free CHE. This is well below the ranges identified

by the SBTi of required emission reductions of 36 %-49 % in 2030 and 75 %-96 % in 2040 based on 2020 GHG emissions [21]. Changing the baseline from the globally handled containers to only the handling capacity accounted for in the terminal data base, leads to 42 % of container being handled emission-free in 2030 and 64 % in 2040. Under this perspective the strategic objectives are in line with required 2030 requirement, but more ambitious goals and efforts are required for 2040. In other words, even if all strategic objectives considered are met and the unaccounted-for capacity is converted at the same rate, emission reduction from CHE will still be below the level required by the maritime transport sector to limit global warming to 1.5 °C.

In summary, the model predicts globally strong growth demanding 250 million TEU emission-free container handling capacity in 2030. Most initiatives focus on reducing emissions from all terminal operations instead of focusing on CHE. The effort is driven mainly by terminal operators acting on a global scale but combined efforts fall short actions required of the target to limit global warming to 1.5 °C above pre-industrial levels.

5 Conclusions & Perspectives

The presented market forecast for emission-free container handling capacity demanded is based on a review of regulations and targets set by governments, private actors and organizations having influence on CHE operation at CTs. To this end, strategic objectives by these actors have been collected, assessed and mapped to the current CHE fleets at affected terminals. Most strategic objectives set goals for 2030 and target general GHG emission reduction as opposed to focusing on emissions from CHE specifically. However, if strategic objectives focus on CHE specifically, they are more ambitious on average. The strategic objectives are predominantly issued by the private sector, especially terminal operators, giving them a disproportionate influence on the forecast. This increases the uncertainty of the model, because private actors are less bound to their self-published objectives compared to law. However, these few actors present an opportunity for further research. Understanding their motivations and approaches could help other actors formulate similar ambitious targets. It could also support policy makers to create reachable GHG emission restrictions. Uncertainty is introduced into the forecast by the variety of reporting standards used by the different actors. Besides different operational and organizational boundaries, different standards for considering negative emissions are used to formulate the reduction targets. Most objectives are formulated broadly, lacking information on individual steps and affected equipment making a detailed forecast and assessment of realizability challenging. It is clear that some CHE types are more easily converted to emission-free versions and will be responsible for a larger share of initial emission reduction. The model predicts that about 250 million TEU will be handled by emission-free CHE in 2030, corresponding to 24% of global containers handled. Even if this goal is achieved, the reductions in GHG emissions are not sufficient to match the level required from the maritime transport sector to keep long term global warming below 1.5 °C above pre-industrial levels as predicted by SBTi. Hence, policy makers not only need to standardize reporting but also participate in goal setting if they want to limit global warming to 1.5 °C.

Data Availability

The used data and code to analyze the data can be provided after request.

6 References

1. Martí Puig, Chris Wooldridge (2022) ESPO Environmental Report 2022
2. Azarkamand S, Wooldridge C, Darbra RM (2020) Review of Initiatives and Methodologies to Reduce CO2 Emissions and Climate Change Effects in Ports. *Int J Environ Res Public Health* 17:3858. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113858>
3. International Maritime Organisation (2022) MEPC.328(76): 2021 Revised MARPOL Annex VI
4. Katarzyna Skrzypek (2023) Containerized Trade Outlook by GTAS Forecasting. <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/mi/research-analysis/containerized-trade-outlook-by-gtas-forecasting-june-2022.html>
5. International Transport Forum (2021) ITF Transport Outlook 2021. ITF Transport Outlook
6. Wohlin C (2014) Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. In: London, England, United Kingdom, pp 1–10
7. Drewry (2022) Global Container Terminal Operators - Annual Report 2016. <https://www.feport.eu/images/downloads/drewry---global-container-terminal-operators-annual-review-and-forecast-2016.pdf>
8. United Nations Conference on Trade and Development (2022) Container port throughput, annual. <https://unctad-stat.unctad.org/wds/TableViewer/tableView.aspx?ReportId=13321>
9. Neltner M (2023) Impact of GHG Regulations at Container Terminals on the Container Handling Equipment Market. Master Thesis, Northern Institute of Technology Management
10. Port of Long Beach (2022) Air Emissions Inventory - 2021
11. Martínez-Moya J, Vazquez-Paja B, Gimenez Maldonado JA (2019) Energy efficiency and CO2 emissions of port container terminal equipment: Evidence from the Port of Valencia. *Energy Policy* 131:312–319. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.04.044>
12. Wieschemann A (2018) Batterie-elektrischer Terminal Truck im Feldversuch: Entwicklung eines batteriebetriebenen Terminal Trucks und Erprobung im Rahmen eines Feldversuchs in einem deutschen Binnenhafen und dem Containerterminal eines deutschen Seehafens, Düsseldorf
13. Song J, Qian H, Zhao D et al. (2021) Particulate matter emission by an isolated rotating wheel. *Build Simul* 14:1163–1173. <https://doi.org/10.1007/s12273-020-0724-0>
14. HHLA (2023) HHLA | The gateway to the future. https://cta-klimaneutral.de/index_en.html
15. CK Hutchison Holdings Limited 2021 Annual Report - Solid, Resilient Ready for Tomorrow
16. Tetra Tech, Gladstein, Neandross & Associates (2022) San Pedro Bay Ports - Clean Air Action Plan: 2021 Update: Feasibility Assessment for Cargo-Handling Equipment
17. Mohr A, Kastner M, Jahn C (2023) Groundbreaking Challenges of Deploying Battery-Electric Terminal Trucks in Container Terminals. In: Springer, Cham, pp 183–198
18. International Maritime Organisation (2021) Resolution A.1149(32): Revised Strategic Plan for the Organization for the Six-Year Period 2018 to 2023
19. International Maritime Organisation (2023) IMO progress on revised GHG strategy, Mediterranean ECA adopted. <https://imopublicsite.azurewebsites.net/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC-79.aspx>
20. (2023) Rules on ship carbon intensity and rating system enter into force. <https://imopublicsite.azurewebsites.net/en/MediaCentre/Press-Briefings/pages/CII-and-EEXI-entry-into-force.aspx>
21. Jean-Marc Bonello, Sophia Parker, Tristan Smith et al. (2022) Science Based Target Setting for the Maritime Transport Sector. <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTi-Maritime-Guidance.pdf>
22. Green Shipping Challenge (2023) Green Shipping Challenge - About. <https://greenshippingchallenge.org/>
23. World Port Sustainability Program (2023) World Port projects – Climate and Energy. <https://sustainableworldports.org/portfolio/type/port-projects/?area-of-interest=climate-and-energy>
24. Ports For People (2022) Ports for People RePORT Cards. <https://portsforpeople.pacificenvironment.org/policymaker/report-cards/>. Accessed 23 Dec 2022
25. California Code of Regulations (2006) Tit. 13, § 2479: Regulation for Mobile Cargo Handling Equipment at Ports and Intermodal Rail Yards
26. Port of Los Angeles (2019) Zero- and Near Zero-Emission Freight Facilities (ZANZEFF) Shore to Store Project
27. Port of Vancouver, Port of Seattle, Port of Tacoma et al. (2021) Northwest Ports Clean Air Strategy 2020
28. A.P. Moller - Maersk (2021) Sustainability Report 2021
29. PSA International (2022) Sustainability Report 2021. <https://www.globalpsa.com/wp-content/uploads/PSA-International-Sustainability-Report-2021.pdf>
30. DP World (2021) The Smarter Trade Report
31. DP World (2023) DP World commits to CO2 reduction and takes on the Green Shipping Challenge. <https://www.dpworld.com/news/releases/dp-world-commits-to-co2-reduction-and-takes-on-the-green-shipping-challenge/>

Auteur principal :

Eugènia Poveda Santiago – Sener Ingeniería y Sistemas SA – eugenia.poveda@sener.es
86-87, Rue Creu Casas i Sicart, 08290 Cerdanyola del Vallès, Espagne

Co-auteurs :

Najat Chaouq – Nador West Med SA - n.chaouq@nadorwestmed.ma
20, Angle Avenue Mohammed VI et Rue D. Mabella, Rabat

José Luis Estrada – Estrada Port Consulting SL - jlestrada@estradaportconsulting.com
23, Rue Enrique Granados, 1-1, 08007 Barcelone, Espagne

Mots clés : planification portuaire, plan d'aménagement, flux des activités, logistique, accès, transbordement, simulation, intermodalité, processus de contrôles, infrastructures, conteneurs, vrac solide, marchandise diverse, énergie, industrie, stockage, réseaux, Nador, Maroc.

Titre de l'article : Aménagement du complexe industrialo-portuaire Nador West Med – Analyse des flux d'activité et transfert des marchandises

Résumé de l'article :

Le Gouvernement du Maroc a décidé, dans le cadre de sa stratégie de développement, d'aménager progressivement une plateforme Industriale-Portuaire dénommée "Nador West Med". La plateforme envisage un port en eau profonde doté de capacités importantes pour le transbordement de conteneurs, le développement d'un pôle énergétique et le traitement des produits vrac solide. Adossée au port, une plateforme multi-métiers ayant pour vocation le développement de zones logistique, énergie, et d'industrie diversifiée est prévue.

Dans ce cadre, Sener a réalisé les études suivantes :

- **Mission 1 – Recueil et analyses critiques des données :**
 - i. Benchmark, évolution de trafic de marchandise et prévision des flux ;
 - ii. Vérification de la capacité de la zone portuaire ;
 - iii. Analyse du *lay-out* des réseaux routier et ferroviaire ;
 - iv. Estimations de consommations et définition conceptuel des réseaux électriques et hydrauliques, et
 - v. Élaboration d'une guide d'exigences environnementales, de sûreté et sécurité industrielle.
- **Mission 2 – Elaboration d'un schéma opérationnel et détaillé des flux** des différentes zones selon le type de marchandises, les différents flux, le mode de transport ou les processus de contrôle et de décision (scanner, contrôle physique, contrôle documentaire, zones d'attente, etc.).

- **Mission 3 – Etablissement du Plan d’Aménagement du SAS d’accès à la Zone Franche**, comprenant accès, zones de contrôle et d’attente, bâtiments, voiries et circuits de circulation. Le dimensionnement a été basé sur les niveaux de service requis, les trafics prévus et la réalisation progressive des infrastructures.
- **Mission 4 – Quantification des flux, adaptation du réseau routier et vérification par micro-simulation de trafic**
- **Mission 5 – Analyse du mode de transfert des marchandises**, avec la définition dans la zone maritime du tracé des voies, de la bande transporteuse à vrac solide et des pipe-racks.

Article’s abstract:

The Government of Morocco has decided, within the framework of its development strategy, to progressively develop an industrial port complex called "Nador West Med". The complex foresees a deep-water port with important capacities container transshipment, the development of an energy pole and the treatment of solid bulk products. Adjacent to the port, a multi-trade platform is planned for the development of logistics, energy and diversified industrial zones.

In this context, Sener carried out the following studies:

- **Task 1 – Data collection and critical analysis:**
 - i. Benchmark, cargo trends analysis, traffic and flow forecasts;
 - ii. Capacity assessment of the port area;
 - iii. Analysis of the road and rail network layout;
 - iv. Consumption estimates and conceptual definition of the electrical and hydraulic networks, and
 - v. Elaboration of an environmental, safety and industrial security requirements guide.
- **Task 2 – Elaboration of a detailed operational flow diagram** of the different areas according to the type of goods, flows, transport mode, control and decision processes (scanner, physical control, documentary control, waiting areas, etc.).
- **Task 3 – Masterplan layout of the SAS to access the Free Zone**, including gates, controls parking areas, buildings, roads and traffic circuits. The dimensioning was based on the required level of service, the forecasted traffic and the progressive development of the infrastructure.
- **Task 4 – Quantification of flows, road network design verified by a traffic micro-simulation**

- **Task 5 – Analysis of the cargo transfer mode**, defining the roads layout, the solid bulk conveyor belt and the pipe racks in the maritime area.

Article :

1. Introduction et enjeux

Le projet de Nador West Med (NWM) s'inscrit dans le cadre de la Stratégie Portuaire Nationale Marocaine à l'horizon 2030, qui vise à développer le commerce international maritime dans la région, à intégrer le système portuaire dans le réseau de transport régional, à contribuer aux équilibres régionaux du Royaume et à promouvoir le développement social, humain et économique de la région.

Le trafic qui sera opéré par NWM devra répondre au besoin spécifique découlant des orientations stratégiques en termes d'indépendance énergétique régionales, de la saisie des opportunités résultants des nouvelles orientations industrielles ou d'un besoin de capacité de transbordement d'hydrocarbures et de conteneurs à l'instar de la terminal Tanger-Med.

Le site, pour l'instant dépourvu de toute activité économique ou urbaine, sera connecté aux réseaux de communication existants ou en projet (autoroutes, voie ferrée, réseau électrique), ce qui permettra au futur Port de Nador West Med, en tant que port d'équilibre inter-régional, de devenir également un port compétitif sur l'hinterland éloigné.

Ce nouveau port serait développé en plusieurs phases à moyen et long terme. La première phase du projet, objet de cette étude, aura les capacités annuelles suivantes :

- 3,5 millions de conteneurs EVP et 2 millions additionnels après extension ;
- 25 millions de tonnes d'hydrocarbures ;
- 7 millions de tonnes de vrac solide ;
- 3 millions de tonnes de marchandises diverses ;
- 400 000 véhicules.

La première phase du port Nador, objet de cette analyse, est constituée d'une digue principale d'approximativement 4.200ml et d'une digue secondaire de 1.187ml, ainsi que des ouvrages d'accostage suivants :

- Un « Terminal Est » (TCE) de 1.520 ml destiné à l'activité des conteneurs ;
- Un « Terminal Ouest » (TCO) de 1.440 ml, dédié aux marchandises générales, dont les 200 premiers mètres du quai seront consacrés aux traitements des activités Ro-Ro. Les derniers 840 ml (qui seront construits ultérieurement) seront destinés à l'activité de marchandise générale et aux conteneurs ;
- Terminal Vrac Spécialisé constitué d'un poste de 360 ml ;
- 3 postes d'hydrocarbures (brut et produits raffinés) ;
- Un quai de 384 ml dédié au trafic Ro-Ro ;

- Un poste pour les remorqueurs et d'autres services situés au fond du TCE.

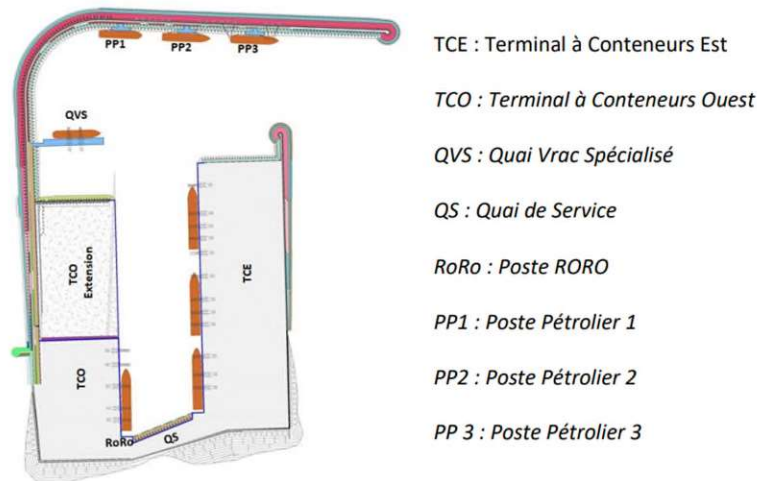


Figure 1 : Plan de masse de la Phase 1 du port NWM. Source : Nador West Med S.A.

L'aménagement de la Phase 1 de la Zone d'Activités, qui couvre une surface adjacente au port d'environ 630 ha, sera conçu afin d'accueillir :

- Les activités commerciales, logistiques, industrielles et de stockage ;
- Les administrations liées au fonctionnement du port et à sa zone d'activité (police, douanes, autorités portuaires, contrôle sanitaire, etc.) ;
- Les services liés au port et à la zone d'activités (agents maritimes, services transitoires, transporteurs, banques, télécoms, etc.).

Nador West Med, conçu pour devenir un pôle commercial et économique vital dans la région, nécessite une planification minutieuse et anticipée pour son développement. Les études menées par SENER abordent les besoins spécifiques de la plateforme industrielle-portuaire en fournissant une compréhension globale des exigences et des défis, facilitant ainsi la prise de décision pour son développement. À cette fin, des facteurs tels que les flux d'activité à moyen et long terme, la capacité des infrastructures, les réseaux routiers, électriques et hydriques, les réglementations environnementales et les exigences en matière de sécurité ont été analysés. Une importance particulière a été accordée à la zone de contrôle frontalier et à l'accès au port pour concevoir les installations et optimiser les opérations portuaires.

2. Études réalisées

2.1 Benchmark et vérification de la capacité de la Zone Portuaire

Le nouveau Port de Nador West Med s'inscrit dans un écosystème portuaire existant et dans lequel il y a eu une évolution significative depuis 2014, date à laquelle a été réalisée l'étude de trafic qui a permis de définir la structure du nouveau port.

Depuis 2014, de nombreux changements sont survenus dans le développement portuaire et la stratégie des compagnies maritimes en raison de différents événements, notamment les événements récents de la crise COVID, la guerre en Ukraine et d'autres aspects tels que le Brexit et l'accélération des politiques environnementales liées au changement climatique et les objectifs de réduction de la pollution (mise en place de la Zone de contrôle des émissions atmosphériques – ECA depuis janvier 2020).

Dans ce contexte, il a été nécessaire de réaliser un benchmark sur l'évolution du trafic de marchandises et des ports internationaux. Parallèlement, la capacité des infrastructures a été vérifiée au moyen de calculs statiques.

2.1.1 Évolution du trafic

Afin de prendre en compte l'évolution du trafic de marchandises, l'analyse réalisée a considéré des tendances générales, les nouvelles tendances de l'industrie, ainsi qu'aux tendances futures de trafics dans la Méditerranée Occidentale.

Par exemple, pour le trafic de conteneurs, une analyse comparative de ports internationaux a été réalisée, en tenant compte des plans de développement des ports voisins et concurrents. Le graphique ci-dessous montre l'évolution prévue de la capacité de manutention de conteneurs en Méditerranée occidentale selon les plans de développement du port, y compris les hypothèses de mise en service de NWM (terminal est en 2024 +3,5 MEVP, terminal ouest en 2027 +2MEVP). De plus, deux scénarios conservateurs d'évolution du trafic à haute croissance sont considérés. On peut constater que, dans le cas d'un scénario de forte croissance (+3,5% par an) une augmentation de la capacité prévue de tous les ports sera nécessaire, y compris les 5,5 MEVP de NWM.

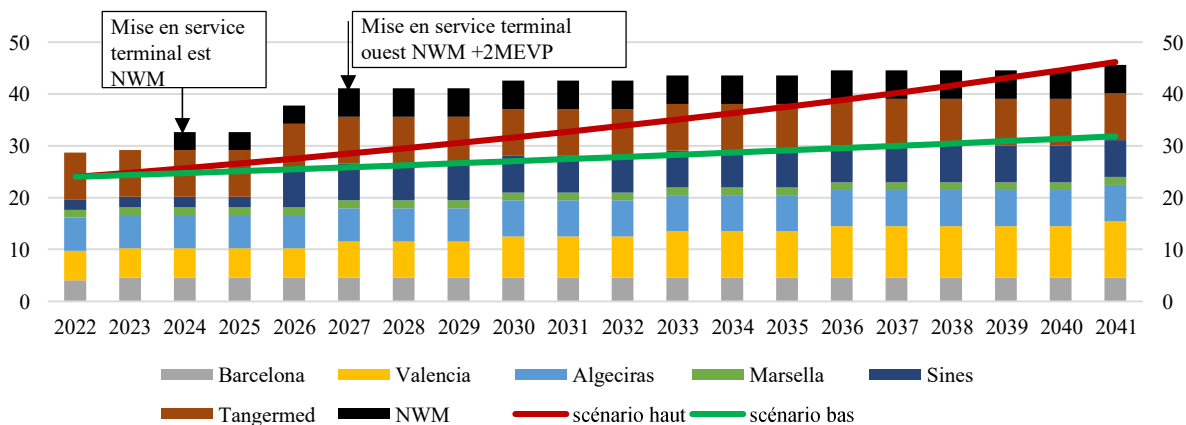


Figure 2 : Évolution prévue de la capacité de traitement des conteneurs et scénarios de développement du trafic. Source : Sener.

Si, selon les rapports de renseignement de l'industrie, une croissance annuelle de 3,5% du trafic de conteneurs est prévue, le trafic passerait d'environ 24 MEVP à 48 MEVP en 20 ans en Méditerranée occidentale, ce qui représenterait un doublement du trafic actuel.

En considérant que l'augmentation prévue de la capacité dans cette zone est de +50 %, il semble donc raisonnable de penser que la nouvelle capacité de +3,5 MEVP de NWM sera utilisée à 100 % dans un avenir proche.

Les résultats de l'analyse pour tous les types de marchandises envisagés pour le terminal de Nador West Med sont présentés dans le tableau ci-dessous.

	Conteneurs	Hydrocarbures	General cargo	Vrac solide	RoRo
Capacité nominale	3,5+2MEVP	25MT	3MT	7MT	400k unités
Fourchette de valeurs attendue selon le benchmark	3,8-5,5MEVP 85-95% transbordement	9-40MT	5-15MT	4-10MT	200k-500k

Tableau 1 – Capacité nominale de NWM par type de marchandise et valeurs attendues selon benchmark.

2.1.2 Vérification de la capacité de la Zone Portuaire

Les conclusions issues du benchmark ont été analysés conjointement avec la vérification de la capacité portuaire et du trafic intermodal au moyen du calculs statiques sur des aménagements préliminaires de chaque terminal. Pour cela, des hypothèses d'exploitation alignées avec les standards compétitifs de terminaux internationaux ont été considérées.

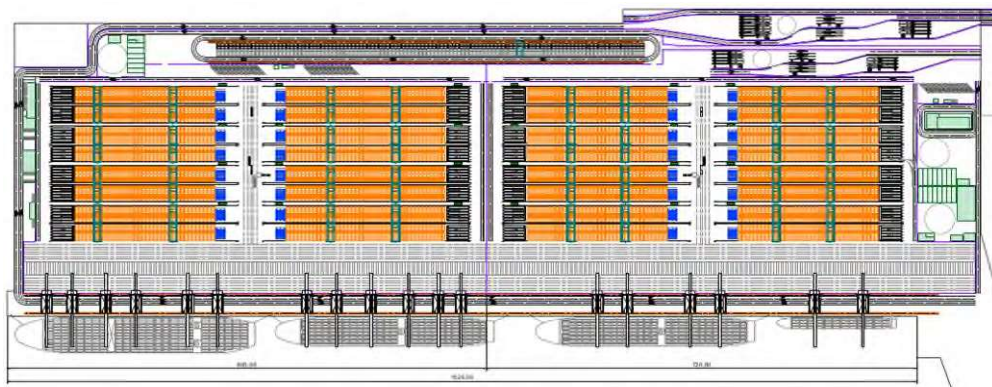


Figure 3 : Plan d'aménagement préliminaire des terminaux à conteneurs Est. Source : Sener.

L'aménagement préliminaire de chaque terminal a permis de déterminer la capacité de stockage, ainsi que d'autres informations nécessaires à la planification globale, telles que les besoins en énergie (eau et électricité) et le calcul du trafic routier calculé avec des coefficients de pointe. L'analyse a également suggéré des adaptations pour donner à l'exploitation du port la flexibilité nécessaire dans le cas du terminal Ro-Ro.

2.2 Schémas opérationnels

L'un des principaux objectifs des études est l'identification et la description des flux et opérations qui vont se développer au SAS, au niveau de la zone portuaire et les zones industrielles et logistiques. Cette description a été représentée en fiches schématiques montrant les points de transit et les opérations qui se dérouleront dans le port et ses environs, en combinant le retour d'expérience du SAS de Tanger Med avec l'expérience internationale. Les fiches permettent de caractériser tous les types de flux prévus au niveau de la Zone Maritime (ZM), la Zone Industrielle (ZI), la Zone Logistique (ZL) et le SAS, pour une quantification ultérieure qui permettra de dimensionner le SAS et le réseau routier.

Sur la base de la description du processus pour les différents types de marchandises, des diagrammes de flux ont été établis, montrant tous les itinéraires alternatifs qui peuvent être envisagés. Les diagrammes sont construits du point de vue du type de véhicule/marchandise et montrent les points de décision. De cette manière, chaque diagramme comprend toutes les options possibles.

2.3 Plan d'aménagement du SAS

Le plan d'aménagement du SAS du contrôle d'accès élaboré tient compte des exigences internationales et marocaines de sûreté et sécurité ainsi que de la réalisation progressive des infrastructures à moyen et long terme. A cette fin, les différentes variantes étudiées ont été justifiées grâce à l'expérience internationale de SENER, le cas spécifique de Tanger Med et, enfin, les besoins spécifiques du futur Port de Nador West Med.

Afin de dimensionner les SAS et faire face au potentiel de développement des différentes activités, une macro-simulation des flux attendus a été réalisée en considérant les niveaux de service et les temps d'attente. Cette simulation permet d'identifier les besoins en infrastructures pour sa mise en œuvre progressive. Les flux ont été pris en compte pour un développement de 60 % des activités en phase 1 et de 100 % en phase 2.

2.4 Simulation des flux

En tenant compte des principaux flux issus des analyses précédentes, une matrice globale des mouvements par zones a été paramétré avec les hypothèses de conception. Pour effectuer l'analyse des flux, différents scénarios ont été considérés, ce qui a permis de travailler par phases et d'adapter l'investissement en infrastructures aux besoins réels de la demande.

La première étape de l'exercice de simulation consiste à effectuer une analyse macro, c'est-à-dire à affecter le trafic attendu sans restriction de capacité afin d'identifier d'éventuels goulots d'étranglement dans le réseau analysé. Cette première étape est réalisée à l'aide d'un logiciel de modélisation du trafic, qui permet d'affecter des flux au réseau routier et de vérifier les conditions de circulation. Ces macro-simulations nous fournissent également les volumes de trafic par sections et direction, ce qui permet une analyse plus détaillée par micro-simulation.

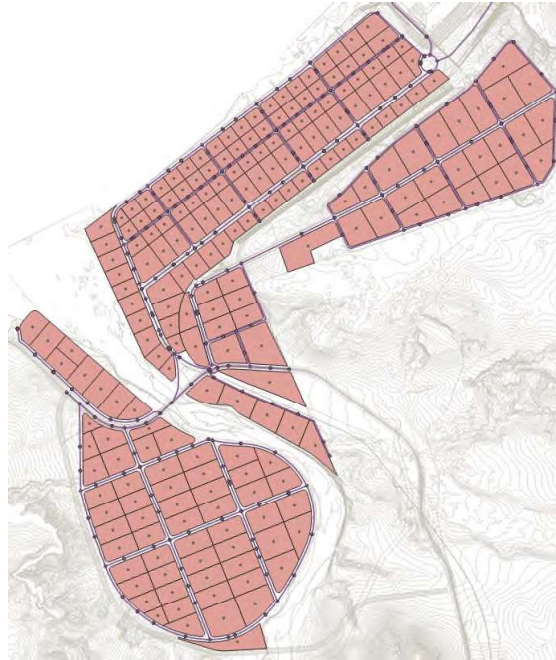


Figure 4 : Zonage des lots appliqué dans le modèle de simulation du trafic. Source : SENER.

À titre d'exemple, la micro-simulation a permis d'analyser l'évolution des longueurs des files d'attente pour le scénario de capacité maximale au niveau du rond-point d'accès, qui est le point le plus sollicité. Comme le montre la figure ci-dessous, les temps d'accès au rond-point sont satisfaisants et il n'y a que des épisodes de congestion de courte durée marqués sur les routes d'accès, qui présentent de toute façon des faibles volumes de trafic.

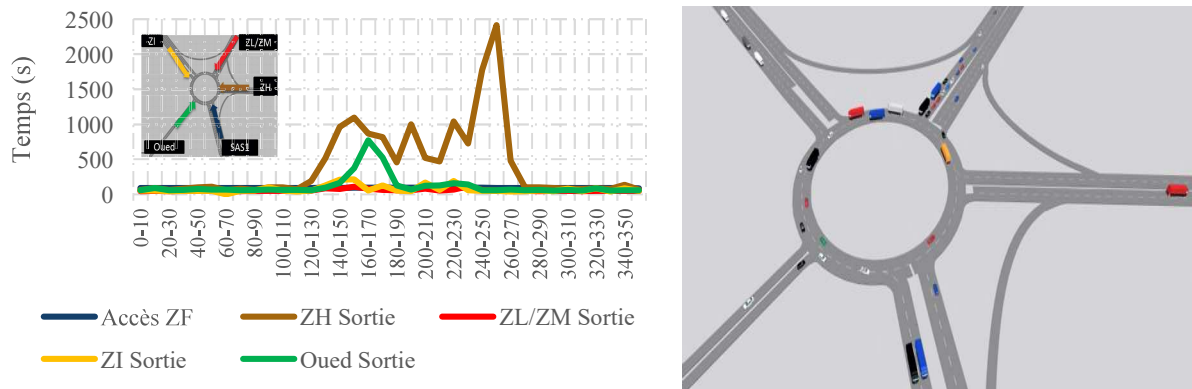


Figure 5 : Micro-simulation du temps d'accès au rond-point avec le scénario de capacité maximale. Source : SENER.

2.5 Dimensionnement des modes de transfert

2.5.1 Voie routière

Les études menées comprennent une analyse détaillée de l'impact du trafic sur le réseau routier, en garantissant la sécurité des manœuvres des véhicules y compris pour les convois spéciaux utilisés pour le transport des pales éoliennes. À cette fin, des adaptations telles que les alignements des axes, le nombre de chaussées, réservations pour des manœuvres ou des bretelles additionnelles ont été proposées selon les véhicules et l'intensité de trafic.

Compte tenu des flux de marchandises prévus, un aménagement indicatif a été proposé pour la plateforme située à l'arrière de la zone portuaire maritime. Cette proposition a permis d'identifier les parcelles publiques (espaces non contrôlés par les opérateurs) à réserver aux manœuvres spéciales de circulation et d'accès, ainsi que les parcelles qui pourraient être dédiées aux terminaux maritimes. L'objectif principal était de doter cette zone de la flexibilité nécessaire pour permettre aux futurs opérateurs d'aménager les accès selon leurs besoins fonctionnels et opérationnels.

2.5.2 Bande transporteuse à vrac solide

La capacité de pointe et le taux d'occupation du quai ont servi de base à la caractérisation de la bande transporteuse et à la définition des besoins de transfert et de la fiabilité de l'ensemble du système sur les bases suivantes :

- Disposer de silos de stockage pour garantir la continuité du système de chargement des trains ou des camions ;
- Minimiser les interférences avec la voie routière et ferroviaire ;
- Assurer la possibilité de mettre en place une certaine redondance en doublant la bande transporteuse entre le quai et le point intermodal pour que les navires puissent toujours décharger ;
- Permettre l'accostage des navires aux deux côtés du quai.

2.5.3 Pipe rack d'hydrocarbures

Le futur port de Nador West Med (NWM) disposera des installations nécessaires pour la réception, le stockage et l'expédition des produits hydrocarbures. Les études réalisées incluent la vérification de la capacité globale, la définition du diagramme de processus de flux des installations projetées, le dimensionnement des sections du pipe rack d'interconnexion ainsi que la définition des équipements complémentaires à installer, tels que des pompes booster additionnels pour assurer la pression ou la mise en place des diamètres des tuyaux plus importants pour les produits les plus demandés. De plus, les problèmes d'interférence et de distribution des hydrocarbures dans la zone de stockage ont été résolus.

2.6 Dimensionnement des réseaux électriques et hydrauliques

La consistance des études comprend la définition des réseaux hydrauliques et électriques nécessaires pour desservir les activités prévues au futur port de Nador West Med. A cet effet, une analyse comparative (benchmark) des ports et une estimation des consommations d'eau et d'électricité ainsi que des puissances à installer ont été réalisés afin de déterminer les dimensions de la station de dessalement, la station d'épuration, les réseaux hydrauliques, le réseau contre incendie, l'éclairage, les réseaux électriques et les centres de transformation nécessaires.

3. Conclusion et perspectives

Les conclusions de l'étude mettent en évidence l'importance d'une planification globale pour les installations nécessaires au futur Port de Nador West Med. L'analyse des données a fourni des informations précieuses sur les tendances du trafic de marchandises (conteneurs, vrac sec, hydrocarbures, Ro-Ro, convois chargés de marchandises spéciales, etc.), permettant ainsi une prise de décision éclairée pour le développement des infrastructures tout en dotant le système de flexibilité. Le cadre opérationnel a rationalisé les processus logistiques, réduisant les retards et garantissant une inspection et un contrôle appropriés des marchandises. Le plan d'aménagement facilite un accès fluide et sécurisé à la zone franche du port, tout en donnant la priorité aux mesures de sécurité. Les techniques de micro-simulation du trafic ont conduit à des adaptations du réseau routier qui réduisent la congestion, améliorant ainsi l'efficacité globale du terminal.

Les enseignements tirés de l'étude peuvent servir de référence pour des projets de développement portuaire similaires, mettant en lumière les avantages d'une planification intégrée pour optimiser les opérations logistiques et assurer le mouvement sécurisé des marchandises à travers le complexe portuaire. Les résultats de l'étude ont souligné l'importance de l'analyse des données, des cadres opérationnels et de la planification des infrastructures pour garantir une plateforme industrielle et logistique accessible, efficace et sécurisée. En mettant en œuvre les recommandations de l'étude, le Port de Nador West Med garantira des opérations portuaires efficaces dans le respect des réglementations douanières et un développement durable des infrastructures. A long terme cette stratégie entraînera la croissance économique régionale.



Auteur principal : Fabrice JAVEL - SUEZ Consulting – fabrice.javel@suez.com
30, avenue Henri Malacrida 13100 AIX EN PROVENCE – France

Co-auteurs :

Robin GAUFF - Università degli Studi di Padova - gauff.robin@yahoo.de
Chioggia Hydrobiological Station “Umberto D’Ancona”, Department of Biology, University of Padova, 30015
CHIOGGIA - Italy

Amelia CURD - IFREMER - Amelia.Curd@ifremer.fr
Antoine CARLIER - IFREMER - Antoine.Carlier@ifremer.fr
Gabin DROUAL - IFREMER - Gabin.Droual@ifremer.fr
1625, route de Ste-Anne 29280 PLOUZANÉ – France

Marc BOUCHOCHA – IFREMER - Marc.Bouchoucha@ifremer.fr
Benoist De VOGUE – IFREMER - Benoist.De.Vogue@ifremer.fr
Laboratoire Environnement Ressources Provence Azur Corse, Zone Portuaire de Brégaillon
83500 LA SEYNE-SUR-MER – France

Luisa MANGIALAJO - Université Côte d’Azur, CNRS, ECOSEAS - luisa.mangialajo@unice.fr
28, avenue Valrose - 06000 NICE – France

Thierry THIBAUT – Aix-Marseille Université - Institut Méditerranéen d’Océanologie - thierry.thibaut@univ-amu.fr Campus de Luminy -13009 MARSEILLE – France

Candice PUISSANT - SUEZ Consulting – candice.puissant@suez.com
Célia LE LAN – SUEZ Consulting – celia.lelan@suez.com
30, Avenue Henri Malacrida 13100 AIX EN PROVENCE – France

Mots clés/Keywords : ouvrages maritimes - éco-conception - éco-mimétisme - cuvettes littorales -
ensemencement - cystoseires - Méditerranée - Atlantique

Plus-value écologique des cuvettes rocheuses artificielles intégrées aux ouvrages maritimes : premiers retours d’expérience en Atlantique et Méditerranée

Résumé

En réponse à des enjeux d’intégration écologique, différentes approches d’éco-conception des ouvrages maritimes ont été développées ces dernières années ; l’objectif étant d’apporter des fonctions écologiques complémentaires aux fonctions techniques premières de ces ouvrages (digues, quais, pontons, corps-morts, émissaires...). En fonction du contexte local, différentes actions peuvent être mises en œuvre et combinées : choix de matériaux favorables à la colonisation, adaptation du micro et macro-design des ouvrages, ajout de dispositifs visant à complexifier l’habitat (après la construction) ou ensemencement en espèces “ingénieuses”.



En France et à Monaco, sur la période 2019-2022, trois grands projets d'infrastructures côtières ont bénéficié d'une nouvelle approche d'éco-conception inspirée de la structure et du fonctionnement des cuvettes rocheuses littorales : la digue du nouveau polder de Brest (Finistère), l'extension en mer à Monaco et la grande jetée de Toulon (Var).

Dans les trois cas, il s'agit de blocs artificiels creux en béton intégrés dans le talus en enrochements. En complément, pour les deux projets en Méditerranée, ces blocs artificiels ont bénéficié d'un ensemencement en cystoseire *Ericaria amentacea* (Fucale) afin d'accélérer le processus de colonisation de cette espèce à forte valeur écologique et à faible distance de dispersion. Dans cette situation, les cuvettes rocheuses artificielles permettent de limiter le broutage par les poissons herbivores (*Sarpa salpa*) et d'augmenter les chances de réussite de l'opération d'ensemencement. Des suivis de la colonisation des cuvettes rocheuses artificielles et des blocs rocheux adjacents sont en cours afin d'évaluer notamment la plus-value écologique et identifier les paramètres clefs en jeu. Les résultats préliminaires tendent à montrer que, dans certaines conditions, la mise en place de cuvettes rocheuses artificielles dans les digues a une influence sur la composition et la structure des communautés de faune et de flore. Ces premiers retours d'expérience permettront d'améliorer encore le design des futurs projets.

Abstract

Faced with the challenges of ecological integration, various eco-design approaches to maritime structures have been developed in recent years, with the aim of providing ecological functions that complement the primary technical functions of these structures (dykes, quays, pontoons, moorings, outfalls, etc.). Depending on the local context, different eco-design options can be implemented and combined: the choice of materials favourable for colonisation, the adaptation of the structure micro- and macro-design, the addition of post-construction devices designed to make the habitat more structurally complex and seeding with 'engineer' species are all examples. In France and Monaco, over the 2019-2022 period, three major coastal infrastructure projects have benefited from eco-design approaches inspired by the structure and functioning of coastal rockpools: the dyke retaining a new polder in Brest (Finistère), the offshore extension in Monaco and the large jetty in Toulon (Var). In all three cases, hollow artificial concrete rockpools were integrated into the rock revetment. In addition, for the two projects in the Mediterranean, these artificial blocks were seeded with the furoid algae *Ericaria amentacea* in order to accelerate the colonisation process of this species, which has a high ecological value and a short dispersal distance. In this situation, the artificial rock pools make it possible to limit grazing by the herbivorous fish (*Sarpa salpa*) and increase the chances of success of the seeding operation. The colonisation of the artificial rock pools and adjacent boulders is being monitored in order to assess the ecological added value and identify the key parameters involved. Preliminary results tend to show that, under certain conditions, the installation of artificial rock pools in dykes has a significant influence on community composition and structure. This initial feedback will help to further improve the design of future projects.



1. Introduction et enjeux

Les cuvettes rocheuses littorales correspondent à des dépressions observables sur les côtes rocheuses. En lien plus ou moins temporaire avec la mer, elles sont présentes à la fois dans les étages supra et médiolittoraux et aussi bien dans les mers à marée que dans les mers où les variations de niveau d'eau sont limitées comme en Méditerranée. A l'origine d'une grande variété de tailles et de formes, les processus impliqués dans la formation des cuvettes sont biologiques (bioérosion ou bioconcrétionnement) et/ou physiques (dissolution ou érosion du substrat rocheux) [1].

Les cuvettes rocheuses peuvent être le lieu de fonctionnalités écologiques clefs (nursérie, zone d'alimentation, refuge) pour de nombreuses espèces [2]. En fonction de paramètres tels que l'altimétrie, la taille, la profondeur ou la complexité des microhabitats internes, les communautés associées diffèrent généralement des substrats rocheux adjacents [2, 3, 4, 5, 6]. Dans toutes les mers tempérées et froides européennes, ces communautés abritent fréquemment des fucales dont notamment les espèces appartenant au genre *Cystoseira sensu lato* [7, 8]. Spécifiquement, en Méditerranée, l'espèce *Ericaria amentacea* (C. Agardh) Molinari & Guiry a fait l'objet d'une attention particulière au regard notamment de ses fonctions écologiques (espèce fondatrice source d'abris et de nourriture pour de nombreuses espèces), de son abondance et de son statut (bio-indicateur dans l'évaluation de la qualité des masses d'eau côtières pour la Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE ; inscrite à l'annexe I de la Convention de Berne et à l'annexe II de la Convention de Barcelone) [9]. Elle se développe sur la plupart des côtes rocheuses à l'exception des zones très calmes ; ses populations sont encore globalement abondantes et stables sur les côtes françaises de Méditerranée. Néanmoins, ces populations ont subi des régressions dans certaines zones anthropisées [10] au sein desquelles l'espèce est susceptible de trouver dans les cuvettes rocheuses un refuge vis à vis des poissons herbivores (saupe : *Sarpa salpa*) avec une protection qui se manifeste par des rameaux plus longs et plus fertiles comparativement à ceux présents sur les roches à proximité [11]. Dans le cadre de travaux sur l'éco-conception des ouvrages maritimes [12, 13, 14], ces observations ont été le point de départ du développement d'un nouveau concept associant cuvettes rocheuses artificielles et restauration des cystoseires [15], c'est-à-dire une modification structurelle des ouvrages combinée à un ensemencement en espèce "ingénieure".

Les cuvettes rocheuses artificielles peuvent ainsi être définies comme des dispositifs éco-conçus mimant les cuvettes naturelles et ayant pour objectif de développer la biodiversité sur les ouvrages (valorisation écologique) en complexifiant la structure de ces habitats artificiels et en offrant à diverses espèces une zone refuge au sein de laquelle les stress liés notamment aux marées, à l'hydrodynamisme ou à la prédation sont atténués. Plusieurs expérimentations de ce type ont été menées à travers le monde (voir par exemple les références 16 à 21) néanmoins les paramètres clés de leur efficacité (design et modalités de déploiement) ne semblent pas encore pleinement compris et maîtrisés.

Au vu des potentialités offertes par ce type d'approche, il est apparu intéressant de valoriser des résultats préliminaires obtenus dans le cadre de projets menés dernièrement en Atlantique et Méditerranée. Ainsi, selon le schéma conceptuel de [22], les questions centrales sont : Quelles sont les différences entre les communautés des cuvettes rocheuses artificielles et celles présentes sur les ouvrages classiques à proximité ? Se rapproche-t-on de ce que l'on peut observer en milieu naturel ? Quelle est la plus-value écologique des cuvettes rocheuses artificielles intégrées aux ouvrages maritimes ? *In fine*, quels sont les premiers retours d'expérience opérationnels que l'on peut en tirer pour le design des futurs projets ?

2. Matériels et méthode

2.1 Sites d'étude

Les installations et les suivis de la colonisation des cuvettes rocheuses artificielles concernent trois sites, dont un dans l'océan Atlantique et deux en Méditerranée. Ces projets ont été mis en œuvre à l'occasion de grands travaux maritimes.

Le premier site d'expérimentation est localisé dans la rade de Brest (Finistère) au niveau du nouveau polder du port de commerce destiné à accueillir des industriels des énergies marines renouvelables. Il s'agit d'une digue de 900 mètres de long composée dans sa partie externe de blocs d'enrochement de 1 à 3 tonnes. Les travaux ont eu lieu entre 2018 et 2019. Le marnage atteint 6 m pour des coefficients de marée de 95.

A Toulon (Var), l'ouvrage concerné est celui de la « grande jetée », digue d'une longueur de 1 300 m protégeant les activités civiles et militaires de la petite rade de Toulon vis-à-vis de l'hydrodynamisme. Datant de la fin du 19^{ème} siècle, cet ouvrage hétérogène composé d'enrochements de 1 à 3 tonnes et de blocs maçonnés a fait l'objet d'importants travaux de réfection entre 2019 et 2022. La présence d'*E. amentacea* sur la face externe de l'ouvrage a été décrite pour la première fois en 1979 [10].

A Monaco, le site d'étude est localisé dans la zone de jonction entre les grands caissons en béton du terre-plein d'extension en mer de la Principauté (projet Mareterra) et les digues de protection des plages du Larvotto. L'ouvrage dans lequel ont été intégrées les cuvettes artificielles est une digue à talus d'environ 90 m linéaires composée de blocs rocheux de 1 à 3 tonnes ; leur mise en place remonte à 2021. Les populations monégasques d'*E. amentacea* ne subsistent plus que sous la forme de quelques patches [10].

Le design expérimental pour les trois sites est similaire avec des stations correspondant à cinq « traitements » différents : cuvettes naturelles, roches naturelles, cuvettes artificielles, enrochements des nouvelles digues à proximité des cuvettes artificielles et enrochements des digues anciennes (Figure 1).

2.2 Cuvettes rocheuses artificielles

Sur les trois sites d'étude, les cuvettes rocheuses artificielles sont des éléments préfabriqués en béton dont le design a été adapté aux caractéristiques du site et de l'ouvrage receveur (Figure 2).

A Brest, les modules sont de forme cubique avec des surfaces lisses (conception Setec In Vivo et Bouygues TP). Constitués de béton armé, leur poids avoisine 11 tonnes. Ils ont été installés au cours du printemps et de l'été 2019. Selon leur inclinaison dans l'ouvrage, la profondeur d'eau varie entre 1,10 et 1,40 m. Au total, 100 cuvettes ont été intégrées dans la carapace de la digue à trois hauteurs différentes dans la zone de marnage (-2 m, -5 m et -8 m en dessous du niveau de la marée haute des vives eaux).

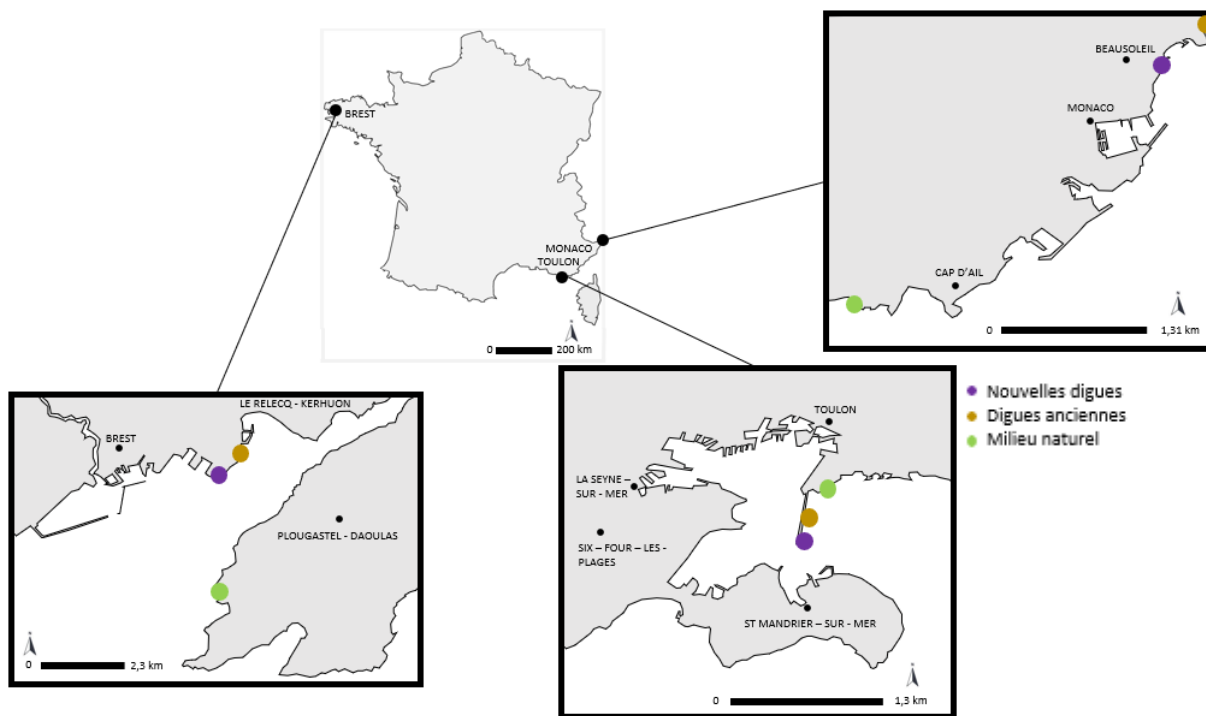


Figure 1 : localisation des sites d'études.

D'une taille inférieure, les cuvettes artificielles intégrées dans la grande jetée de Toulon sont de type *Tide pool* développé par la société EConcrete®. Il s'agit de blocs moulés d'une masse totale de 1,4 tonnes en béton pour un volume intérieur de 600 litres et une hauteur d'eau maximale de 45 cm. Leur conception intègre notamment une rugosité de surface (échelle millimétrique) et un échagement visant à développer la diversité des micro-habitats. Afin de favoriser le renouvellement des eaux, un perçage a été réalisé à mi-hauteur. L'installation des 10 *Tide pools* a été réalisée en février 2022 à proximité du musoir sud sur la face externe (exposée à l'hydrodynamisme). Les niveaux altimétriques sont identiques (± 2 cm) et correspondent à celui auquel se développe *E. amentacea* (autour du niveau moyen de la mer).

Les contraintes de calendrier pour le projet de Monaco ont imposé la conception de cuvettes artificielles spécifiquement adaptées pour être installées après la fin des travaux de création de l'ouvrage support (conception SUEZ Consulting avec l'appui de la société Seaboost). Les dimensions ont ainsi été définies selon celles des blocs rocheux devant accueillir les modules. *In fine*, ces cuvettes artificielles présentent une masse d'environ 100 kg pour une hauteur intérieure de 15 cm et une capacité volumique d'une dizaine de litres. Grâce aux possibilités offertes par l'impression béton 3D, leur design intègre des invaginations et une rugosité notable à la fois sur les parois et sur le fond (échelle centimétrique) ; le renouvellement d'eau est facilité par de petites ouvertures à mi-hauteur. La stratégie d'implantation intègre des niveaux altimétriques variables (± 17 cm) tout en restant dans la gamme de développement d'*E. amentacea*. L'ajustement au niveau cible et la solidarisation avec les blocs support sont assurés par un système de scellement et un socle de béton de hauteur adaptée au cas par cas. Au total, 11 cuvettes artificielles ont été installées sur le site en juin 2021.

2.3 Ensemencement en cystoseires

En complément, pour les deux projets localisés en Méditerranée, les cuvettes rocheuses artificielles ont bénéficié d'un ensemencement en *E. amentacea*. Dans cette situation, les modules ont pour objectif de limiter la prédation par les poissons herbivores (i.e. les saupes *Sarpa salpa*) et à augmenter ainsi les chances de réussite de l'opération [23, 24].

Développé et testé sur les ouvrages du port de commerce de Marseille, dans les calanques de Marseille et sur la digue principale du port Vauban à Antibes, l'ensemencement est réalisé selon le procédé CYSTORE®. Celui-ci vise à recréer un habitat structuré et fonctionnel ainsi qu'à initier ou accélérer le processus de colonisation de substrats rocheux par *E. amentacea* en forçant les contraintes liées à sa faible capacité dispersive [25, 26, 27 ; bien que pouvant se disperser sur de longues distances, la majorité des recrutements s'effectuent de proche en proche ; 28). Il est effectué à partir de rameaux fertiles d'*E. amentacea* (parties non pérennes) prélevés au sein des ceintures denses et étendues proches du site receveur (procédé proche de celui mis en œuvre sur d'autres espèces ; 29, 30). Ces rameaux, assemblés sous forme de bouquets, sont ensuite fixés à l'intérieur des cuvettes rocheuses artificielles préalablement équipées d'anneaux (généralement trois opérations d'ensemencement espacées de trois semaines à l'aide de bouquets constitués d'une dizaine de rameaux). Pendant quelques semaines, ceux-ci émettent des zygotes qui vont donner de jeunes recrues visibles à l'œil nu dans les mois suivants. Les ensemencements ont été réalisés en juillet 2021 à Monaco (une dizaine de bouquets par cuvette et campagne d'ensemencement) et en juillet 2022 à Toulon (une quinzaine de bouquets par cuvette et campagne d'ensemencement).

2.4 Evaluation de la plus-value écologique

Afin de répondre à la question de la plus-value écologique des cuvettes rocheuses artificielles, un protocole de suivi à long terme (i.e. 10 à 15 ans) de la biodiversité benthique des trois sites a été initié. Ces suivis ont pour objectif de caractériser la biodiversité benthique des cuvettes artificielles afin de :

1. Déterminer l'apport des cuvettes artificielles par rapport aux enrochements classiques ;
2. Déterminer les variations spatiales et temporelles (dynamiques à long terme) des communautés benthiques associées aux cuvettes artificielles.

L'inventaire de la faune et de la flore fixés est effectué selon la méthode « *Rapid Assessment Survey* » (RAS), où l'observateur relève pendant une durée fixe de 5 minutes (1 min 30 pour la flore et 3 min 30 pour la faune) le maximum de taxons présents dans la cuvette. L'abondance relative est évaluée sur une échelle semi-quantitative d'abondance SACFOR (Super abondant ; Abondant ; Commun ; Fréquent ; Occasionnel ; Rare). Les campagnes de suivi dont les résultats sont présentés ici ont été réalisées en mars 2022 pour Brest, en mai 2022 et juillet 2023 à Monaco ainsi qu'en octobre 2022 et mars 2023 à Toulon.

Spécifiquement pour *Ericaria amentacea*, le suivi du processus de la colonisation des ouvrages est basé sur la comptabilisation des individus (détection à partir d'une longueur de l'ordre de 3 à 5 mm selon les conditions de mer) et la mesure de leur longueur totale (axes primaires + axes secondaires ; précision ± 3 mm). En complément, durant la période estivale, la présence d'apex fertiles est relevée (observations *in situ* à l'œil nu). La zone d'investigation inclut les cuvettes artificielles et les roches avoisinantes (quelques mètres autour).



Figure 2 : cuvettes rocheuses artificielles intégrées aux ouvrages (a : Brest ; b : Toulon ; c : Monaco).
© SUEZ Consulting.

2.5 Analyse des données

La richesse spécifique (S) et l'indice de diversité *Shannon* (H') ont été calculés pour l'ensemble de la communauté benthique (animale et végétale) de chaque échantillon à l'aide du package 'vegan' (version 2.4-6) [31] sous 'R' (version 4.2.2) [32]. L'abondance de la faune mobile a été calculée par échantillon. Ces variables ont été testées pour observer l'effet du traitement. Pour Brest et Toulon, cet effet a été analysé avec une ANOVA, suivi par un *General linear hypothesis test* (glht) avec le paramètre *Tuckey* du package 'multcomp' (version 1.4-23) [33] afin d'identifier les différences deux-à-deux entre traitements. Afin de comptabiliser les deux années de suivis pour Monaco et de palier aux problèmes liés à la non-indépendance des échantillons dans un suivi annuel, un *Linear Mixed-Effect Model* (lmer) du package *lme4* (version 1.1-32) [34] prenant en compte l'année du suivi en tant que facteur aléatoire a été appliqué. Par la suite un *General linear hypothesis test* a été appliqué comme décrit précédemment. Le même traitement a été appliqué pour l'abondance de la faune mobile. Pour le site de Brest, la différence de composition taxonomique entre les communautés des cuvettes artificielles et celles des enrochements classiques adjacents a été calculée à l'aide de la distance de *Bray Curtis*, et exprimée en pourcentage de similarité/dissimilarité. Pour chaque niveau bathymétrique et chaque secteur de la digue ont été calculés la moyenne et l'écart type des distances de chaque couple "cuvette artificielle/enrochement" ($n=3$ à 12, selon les secteurs et les niveaux bathymétriques).

3. Résultats

3.1 « Diversité »

Sur les sites de Brest et Monaco les cuvettes artificielles ont une richesse spécifique et un indice de diversité *Shannon* significativement plus élevée que les enrochements de la digue dans laquelle elles sont intégrées (*glht*, *z-value* < -3.34, *p* < 0.007 ; *glht*, *z-value* < -2.93, *p* < 0.028 ; Figure 4). A Brest, elles ont même un niveau de biodiversité comparable aux substrats naturels ; ces effets ne sont toutefois pas perceptibles sur la faune mobile (Figure 4). Sur ce site où les marées sont très marquées, l'influence du niveau bathymétrique sur le degré de similarité taxonomique entre les communautés benthiques des cuvettes artificielles et celles des enrochements adjacents est perceptible : la ressemblance augmente lorsque le niveau bathymétrique considéré diminue (Figure 3). A Toulon, aucune des métriques testées ne semble être affectée significativement par la présence des cuvettes artificielles.

3.2 Recrutement initial, survie, croissance et fertilité d'*E. amentacea*

Sur les deux sites concernés, plusieurs centaines d'individus d'*E. amentacea* ont été observés dès l'année d'ensemencement¹ et ce, aussi bien sur les cuvettes artificielles que sur les roches à proximité (Figure 5). Par la suite, l'effectif s'est réduit. Ainsi, à Monaco, entre mai 2022 et mai 2023, le taux de survie a été de 36 % dans les cuvettes artificielles et de 20 % à l'extérieur (roches avoisinantes et parois extérieures des cuvettes). A Toulon, le différentiel est plus marqué puisque le taux de survie entre octobre 2022 et mai 2023 a atteint 56 % à l'intérieur des cuvettes artificielles pour seulement 8% à l'extérieur.

Les écarts intérieur - extérieur s'expriment également sur la longueur des individus. En effet, au mois de mai, période de développement maximal d'*E. amentacea*, on observe des différences très nettes, en particulier à Monaco avec des longueurs moyennes de plus de 17 cm à l'intérieur des cuvettes contre moins de 3 cm à l'extérieur (Figure 6). Plus tard, en juillet, à Monaco la majorité des individus implantés au sein des cuvettes présentait des apex fertiles tandis qu'à Toulon peu de signes de fertilité étaient décelables à l'œil nu.

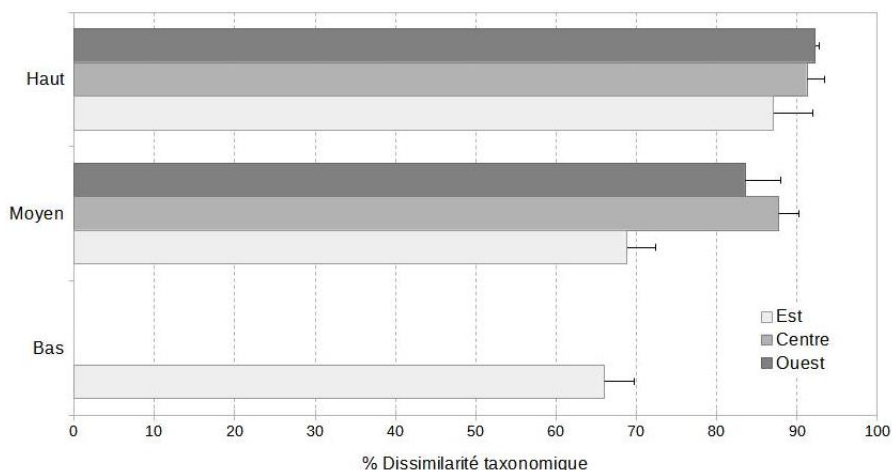


Figure 3 : pourcentage de dissimilarité taxonomique entre les communautés benthiques des cuvettes artificielles et celles des enrochements classiques, aux différentes hauteurs et sur les différents secteurs de la digue du polder de Brest.

¹ A Monaco, les recrues présentes sur les enrochements ont été détectées tardivement (mai 2022). Elles étaient forcément déjà présentes au mois d'octobre 2021 au vu du cycle de vie de l'espèce (reproduction seulement en été).

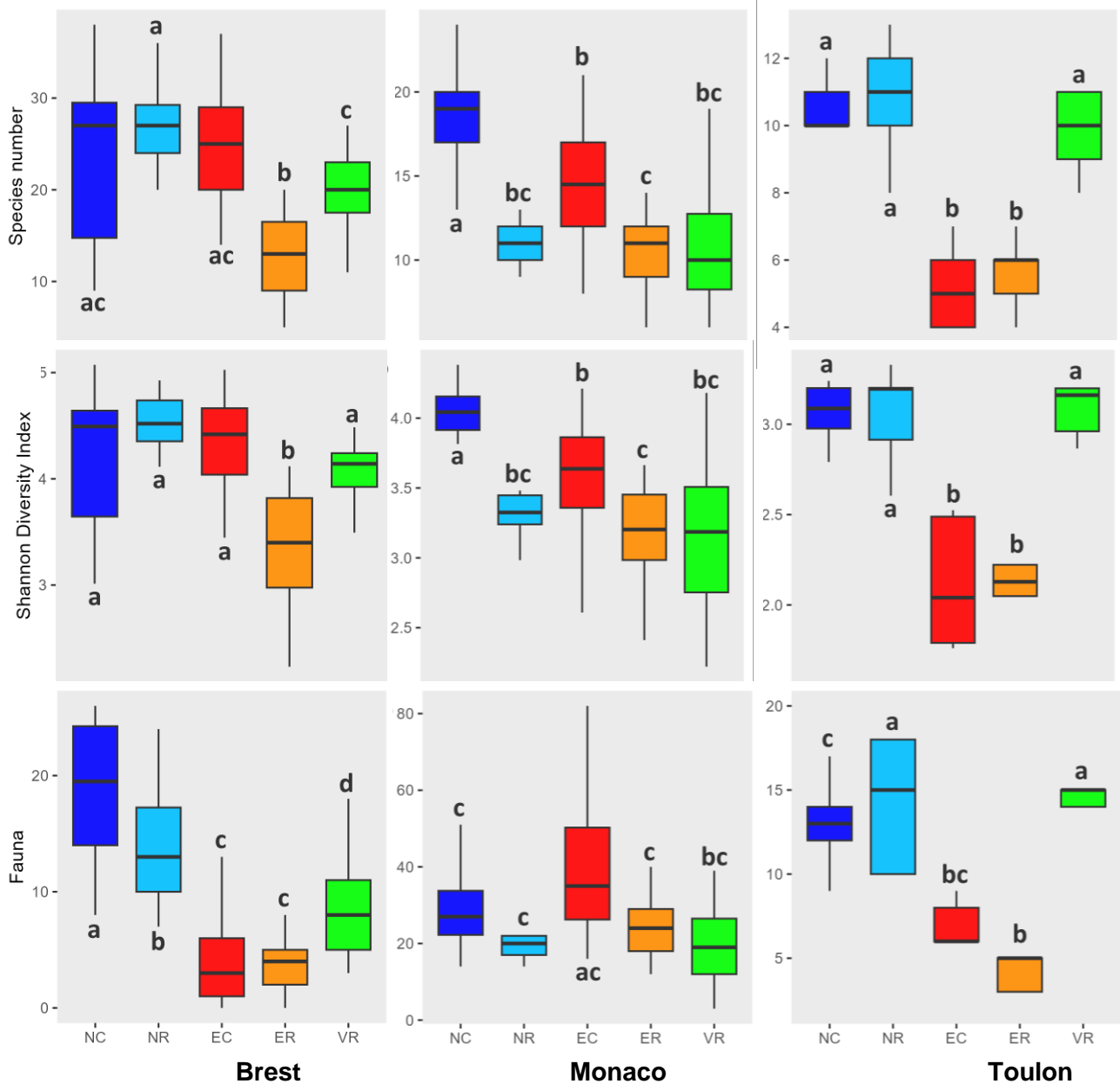


Figure 4 : richesse spécifique, indice de diversité Shannon (faune et flore totales) et abondance de la faune mobile par traitement (NC : cuvettes naturelles ; NR : roches naturelles ; EC : cuvettes artificielles "écoblocs" ; ER : enrochements à côté des cuvettes artificielles ; VR : enrochements des vieilles digues). Les groupes de lettres indiquent les différences significatives ($p < 0.05$; General Linear Hypothesis Test, glht après modèle linéaire pour Brest (29 cuvettes) et Toulon (5 cuvettes) et modèle linéaire à effet mixte pour Monaco (9 cuvettes, 2 dates de suivi). Boxplots : quartiles et médiane.

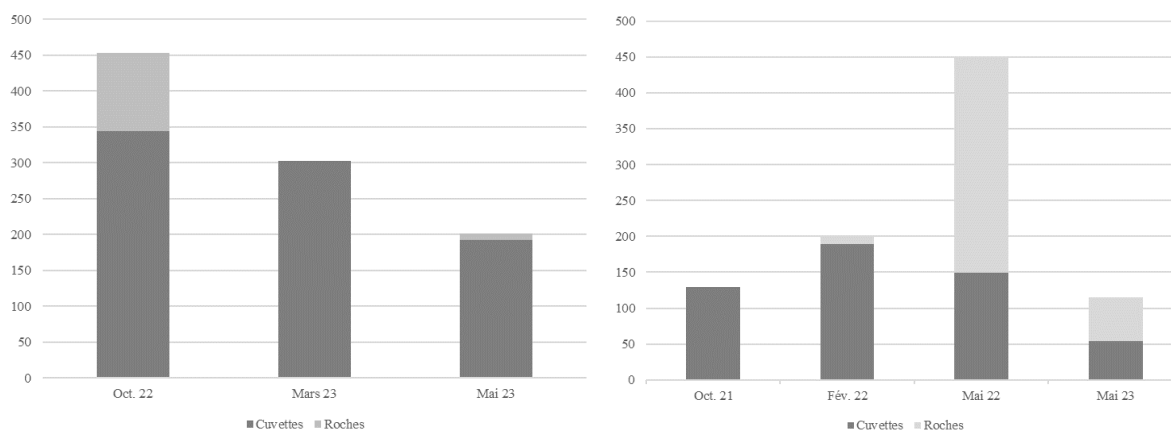


Figure 5 : évolution du nombre d'individus d'E. amentacea sur les sites de Toulon et Monaco.

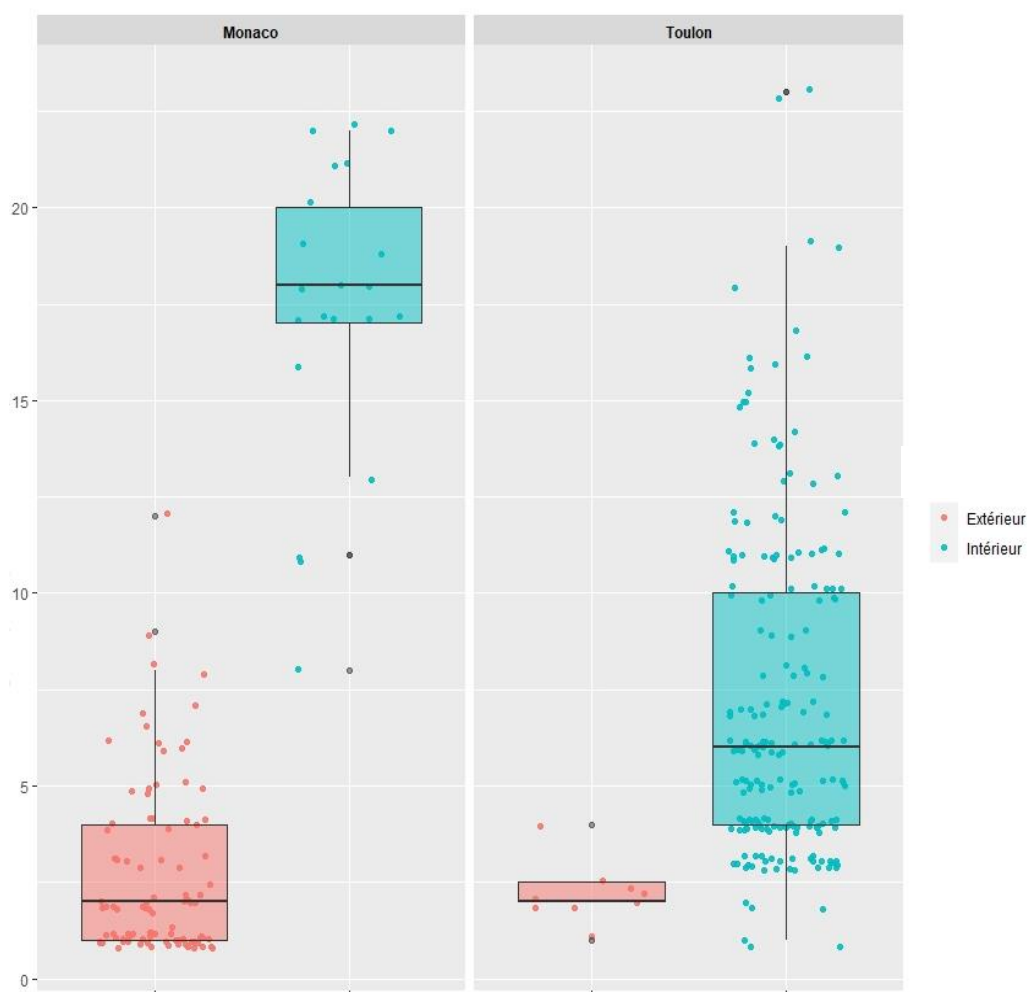


Figure 6 : longueur totale des individus d'E. amentacea (cm) sur les sites de Toulon et Monaco – comparaison entre l'intérieur et l'extérieur des cuvettes artificielles – mai 2023.

Boxplots : quartiles et médiane.

4. Discussion

Les cuvettes artificielles semblent bien apporter une plus-value écologique aux ouvrages dans lesquels elles sont intégrées. Sur deux des trois sites (Brest et Monaco), la biodiversité paraît augmentée, atteignant en moins de 3 années des niveaux comparables aux anciens ouvrages et se rapprochant des milieux naturels.

A Brest, la faible abondance de la faune mobile dans la nouvelle digue et en particulier dans les cuvettes artificielles peut s'expliquer par le fait que ces modules présentent des parois lisses et offrent très peu de microhabitats "refuge" pour cette faune mobile. La plus-value écologique des cuvettes artificielles, exprimée ici en termes de différence de composition taxonomique par rapport aux communautés benthiques de faune installées sur les enrochements adjacents, semble diminuer sensiblement du niveau haut vers le niveau bas. Cela peut s'expliquer en grande partie par le fait que le temps d'émersion des enrochements diminue du haut vers le bas de l'estran. Il est à noter cependant que, sur le niveau bas, on trouve encore 60 à 70% de dissimilarité entre les cuvettes artificielles et les enrochements, ce qui tient sans doute au fait que le substrat est principalement vertical et concave dans le premier cas et horizontal et convexe dans le second cas. Or, l'orientation du substrat, comme d'autres facteurs abiotiques, tels que la rugosité, l'hydrodynamisme et l'exposition à la lumière, a une forte influence sur la biodiversité benthique. Pour cette raison, l'intérêt de comparer les cuvettes artificielles avec les enrochements adjacents a ses limites. Indépendamment de leur ressemblance taxonomique avec les enrochements classiques, les assemblages d'espèces des cuvettes artificielles du niveau haut apparaissent plus singuliers que ceux des cuvettes artificielles des niveaux moyen et bas, ce qui accorde *a priori* une plus grande plus-value écologique aux cuvettes artificielles du niveau haut. Toutefois, cette comparaison ne tient pas compte de la part relative des espèces non-indigènes dans ces différents assemblages.

A Monaco, les indices de diversité des cuvettes sont globalement élevés malgré le laps de temps relativement court entre l'installation de ces structures et leur suivi (15 à 18 mois). Cela suggère que le type de substrat et le design des cuvettes sont propices à une installation rapide des assemblages benthiques. En dépit des petites dimensions de ces structures, leur configuration tridimensionnelle semble jouer un rôle de refuge efficace vis-à-vis de la faune mobile, contrairement aux cuvettes installées à Brest. Par ailleurs, d'après les observations qualitatives, les variations altimétriques, même minimales (quelques cm) semblent influencer fortement sur l'abondance et la structure des communautés. Une analyse plus approfondie des données devra être menée pour étayer ces observations qui pourront avoir des implications opérationnelles notables.

Les résultats obtenus à Toulon sont plus mitigés. Les indicateurs de diversité n'ont en effet pas mis en évidence de différences significatives entre les cuvettes et les enrochements adjacents. A ce titre, l'installation de cuvettes artificielles ne semble pas avoir eu d'effet significatif sur la biodiversité. Il est fort probable que les communautés ne soient pas suffisamment « matures » ; la colonisation des cuvettes suivra certainement un schéma similaire à celui observé dans les sites naturels et artificiels de manière générale. Ce schéma implique tout d'abord une prédominance d'espèces éphémères en phase initiale, suivie de l'émergence et de l'établissement progressif de communautés plus stables et durables [35]. Ces espèces éphémères présentent généralement une faible résilience vis-à-vis des conditions environnementales extrêmes. Or, une partie de la Méditerranée Nord-Occidentale, dont le secteur de Toulon, a connu début 2023 un phénomène exceptionnel par sa durée de niveau bas de la mer couplé à une quasi-absence de houle qui a engendré une exondation de plus de 10 jours des cuvettes artificielles et des enrochements de la digue. Il est possible que ce phénomène explique en partie les résultats observés sur Toulon. La poursuite des suivis permettra de préciser cette hypothèse.

Spécifiquement pour les cystoseires, l'intérêt des cuvettes artificielles s'est exprimé dès la première étape des opérations. En effet, les rameaux fertiles utilisés pour l'ensemencement sont restés quasiment intacts et probablement fonctionnels (émission de zygotes) pendant plusieurs semaines alors que lors des précédents ensemencements CYSTORE® réalisées directement sur le substrat rocheux sans protection, les rameaux ont rapidement été consommés, réduisant mécaniquement le flux de zygotes [26, 27]. Le deuxième effet bénéfique concerne les taux de survie des recrues qui apparaissent nettement supérieurs au sein des cuvettes artificielles comparativement à l'extérieur et également à ceux relevés sur d'autres opérations menées en France [26, 27]. Enfin, la plus-value la plus évidente porte sur la longueur et la fertilité des individus d'*E. amentacea*. Le processus sous-jacent le plus probable pour expliquer ces effets induits est bien une limitation de l'accessibilité pour les saupes et de fait, une réduction drastique de la pression de prédation. Il s'agit d'un net progrès par rapport aux expérimentations précédentes et systèmes de protection moins pérennes déjà testés par le passé [25, 26, 27]. La combinaison cuvettes artificielles - ensemencement en *E. amentacea* devra néanmoins encore faire ses preuves vis-à-vis de l'objectif d'expression complète du potentiel de colonisation des ouvrages concernés. Plusieurs années de suivi seront encore nécessaires.

Globalement, les indicateurs de « biodiversité » utilisés ici sont relativement simples [36] et ne tiennent compte ni de la composition de la communauté qui colonise ces substrats ni des fonctions écologiques associées (sauf pour la comparaison entre cuvettes et enrochements adjacents à Brest). Une vision plus large des espèces colonisant ces cuvettes sera nécessaire pour approfondir les résultats et pour éviter de favoriser une biodiversité 'non désirable' comme les espèces non indigènes qui semblent parfois profiter des projets de restauration [37, 38]. Les approches écosystémiques intégrées jouent aujourd'hui un rôle crucial dans l'évaluation de l'état de santé environnementale des écosystèmes marins littoraux, face à l'impact simultané de multiples facteurs de stress. Ces méthodes s'imposent en raison de leur capacité à prendre en considération les divers éléments qui composent le réseau trophique, ainsi que les interactions complexes entre eux. De plus, elles sont aptes à repérer les changements de dynamique qui entraînent souvent des répercussions à plusieurs niveaux trophiques différents [39]. Aujourd'hui, les paradigmes de la politique européenne insistent sur la nécessité de mettre en place une gestion environnementale holistique et de développer des indices intégrés pour évaluer la santé écologique des écosystèmes marins (e.g. reef-EBQI) [39].

5. Conclusion et perspectives

Les résultats obtenus après deux à trois années de colonisation tendent à mettre en évidence un intérêt écologique des cuvettes rocheuses artificielles intégrées aux ouvrages maritimes, cet effet positif se manifestant à la fois en Méditerranée et en Atlantique et dès la première année pour *E. amentacea*.

Bien qu'il s'agisse de résultats préliminaires, nous pouvons dès à présent tirer des premiers enseignements opérationnels ou, du moins, des pistes de réflexion. En intégrant des observations plus qualitatives, les points d'attention se situent à l'échelle des cuvettes avec des designs pouvant certainement être améliorés en développant les micro-habitats [4], en maximisant le renouvellement des eaux et en limitant la sédimentation. Des paramètres tels que la profondeur ou le volume interne sont notamment à prendre en compte. A l'échelle des ouvrages dans lesquels les cuvettes artificielles sont intégrées, il sera certainement utile dans le futur d'engager une réflexion sur le déploiement de cuvettes artificielles de taille et design variés plutôt qu'un modèle unique. Sur les côtes soumises à de grandes marées, le déploiement devra être *a priori* plutôt privilégié sur les niveaux intermédiaires et hauts en gardant toutefois une attention pour les espèces non-indigènes.



Les perspectives se situent également au niveau de l'optimisation du potentiel écologique (capacité à être colonisé par des communautés d'intérêt) de l'intégralité des ouvrages par la prise en compte de paramètres de conception tels que la pente ou la rugosité.

Enfin, le changement d'échelle, c'est-à-dire, le passage du stade « projet pilote » au stade « projet opérationnel » (déploiement de cuvettes sur proportion significative du linéaire de l'ouvrage), apparaît désormais comme une nécessité. Néanmoins, les évaluations sur le long terme restent indispensables pour décrire les processus de colonisation, comprendre les mécanismes sous-jacents dans une démarche d'évaluation écosystémique intégrative et continuer à apporter des données robustes aux « éco-concepteurs ».

Remerciements

Les équipes impliquées dans les trois projets présentés ici tiennent à remercier tout particulièrement pour leur soutien la Région Bretagne, l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, Bouygues Travaux Publics Monaco, le service d'infrastructure de la Défense de Toulon et la Région Sud.

Références bibliographiques

- [1] De Pippo, T., & Donadio, C. (1999). Morphology, genesis and evolution of rockpools along Italian coasts. *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 22(2), 129-141.
- [2] Firth, L. B., Schofield, M., White, F. J., Skov, M. W., & Hawkins, S. J. (2014). Biodiversity in intertidal rock pools: Informing engineering criteria for artificial habitat enhancement in the built environment. *Marine Environmental Research*, 102, 122-130.
- [3] Martins, G. M., Hawkins, S. J., Thompson, R. C., & Jenkins, S. R. (2007). Community structure and functioning in intertidal rock pools: effects of pool size and shore height at different successional stages. *Marine Ecology Progress Series*, 329, 43-55.
- [4] Schaefer, N., Mayer-Pinto, M., Johnston, E. L., & Dafforn, K. A. (2023). Understanding the role of microhabitats in intertidal rock pools to guide future eco-engineering designs. *Marine Biology*, 170(4), 44.
- [5] Underwood, A. J., & Skilleter, G. A. (1996). Effects of patch-size on the structure of assemblages in rock pools. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 197(1), 63-90.
- [6] Metaxas, A., & Scheibling, R. E. (1993). Community structure and organization of tidepools. *Marine Ecology Progress Series*, 98 (1-2), 187-198.
- [7] Jégou, C., (2011). Étude du genre *Cystoseira* des côtes bretonnes : taxinomie, écologie et caractérisation de substances naturelles. 2011. Thèse de doctorat. Université de Bretagne Occidentale.
- [8] Robvieux, P., (2013). Conservation des populations de *Cystoseira* en régions Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Corse. Thèse de doctorat. Université Nice Sophia-Antipolis.



- [9] Blanfuné, A., Thibaut, T., Boudouresque, C. F., Mačić, V., Markovic, L., Palomba, L., Verlaque, M., Boissery, P. (2017). The CARLIT method for the assessment of the ecological quality of European Mediterranean waters: Relevance, robustness and possible improvements. *Ecological indicators*, 72, 249-259.
- [10] Thibaut, T., Blanfuné, A., Markovic, L., Verlaque, M., Boudouresque, C. F., Perret-Boudouresque, M., Macic, V., Bottin, L. (2014). Unexpected abundance and long-term relative stability of the brown alga *Cystoseira amentacea*, hitherto regarded as a threatened species, in the north-western Mediterranean Sea. *Marine pollution bulletin*, 89(1-2), 305-323.
- [11] Gianni, F., Bartolini, F., Pey, A., Laurent, M., Martins, G. M., Airoidi, L., & Mangialajo, L. (2017). Threats to large brown algal forests in temperate seas: the overlooked role of native herbivorous fish. *Scientific reports*, 7(1), 6012.
- [12] Chapman, M. G., & Blockley, D. J. (2009). Engineering novel habitats on urban infrastructure to increase intertidal biodiversity. *Oecologia*, 161, 625-635.
- [13] Dafforn, K. A., Mayer-Pinto, M., Morris, R. L., & Waltham, N. J. (2015). Application of management tools to integrate ecological principles with the design of marine infrastructure. *Journal of Environmental Management*, 158, 61-73.
- [14] O'Shaughnessy, K. A., Hawkins, S. J., Evans, A. J., Hanley, M. E., Lunt, P., Thompson, R. C., Francis, R. A., Hoggart, S. P. G., Moore, P. J., Iglesias, G., Simmonds, D., Ducker, J. & Firth, L. B. (2020). Design catalogue for eco-engineering of coastal artificial structures: a multifunctional approach for stakeholders and end-users. *Urban Ecosystems*, 23, 431-443.
- [15] Thibaut, T., Blanfuné A., Javel, F., Puissant, C. (2021). Is it possible to restore algal forest on large areas? The French experience. 9th World Conference on Ecological Restoration.
- [16] Firth, L. B., Thompson, R. C., White, F. J., Schofield, M., Skov, M. W., Hoggart, S. P., Jackson, J., Knights A.M. & Hawkins, S. J. (2013). The importance of water-retaining features for biodiversity on artificial intertidal coastal defence structures. *Diversity and distributions*, 19(10), 1275-1283
- [17] Browne, M. A., & Chapman, M. G. (2011). Ecologically informed engineering reduces loss of intertidal biodiversity on artificial shorelines. *Environmental science & technology*, 45(19), 8204-8207.
- [18] Chapman, M. G., & Underwood, A. J. (2011). Evaluation of ecological engineering of "armoured" shorelines to improve their value as habitat. *Journal of experimental marine biology and ecology*, 400(1-2), 302-313.
- [19] Hall, A. E., Herbert, R. J., Britton, J. R., Boyd, I. M., & George, N. C. (2019). Shelving the coast with vertipools: retrofitting artificial rock pools on coastal structures as mitigation for coastal squeeze. *Frontiers in marine science*, 6, 456.
- [20] Perkol-Finkel, S., & Sella, I. (2015). Harnessing urban coastal infrastructure for ecological enhancement. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering* (Vol. 168, No. 3, pp. 102-110). T. Telford Ltd.



- [21] Morris, R. L., Golding, S., Dafforn, K. A., & Coleman, R. A. (2018). Can coir increase native biodiversity and reduce colonisation of non-indigenous species in eco-engineered rock pools? *Ecological Engineering*, 120, 622-630.
- [22] Morris, R. L., Heery, E. C., Loke, L. H. L., Lau, E., Strain, E. M. A., Airolidi, L., Alexander, K. A., Bishop, M. J., Coleman, R. A., Cordell, J. R., Dong, Y.-W., Firth, L. B., Hawkins, S. J., Heath, T., Kokora, M., Lee, S. Y., Miller, J. K., Perkol-Finkel, S., Rella, A., ... Leung, K. M. Y. (2019). Design Options, Implementation Issues and Evaluating Success of Ecologically Engineered Shorelines. In S. J. Hawkins, A. L. Allcock, A. E. Bates, L. B. Firth, I. P. Smith, S. E. Swearer, & P. A. Todd (Eds.), (2019). Design options, implementation issues and evaluating success of ecologically engineered shorelines. *Oceanography and Marine Biology* (1st ed., pp. 169–228). CRC Press.
- [23] Cebrian, E., Tamburello, L., Verdura, J., Guarnieri, G., Medrano, A., Linares, C., Hereu, B., Garrabou, J., Cerrano, C., Galobart C. & Fraschetti, S. (2021). A roadmap for the restoration of Mediterranean macroalgal forests. *Frontiers in Marine Science*, 8, 709219.
- [24] Monserrat, M., Verdura, J., Comeau, S., Cottalorda, J. M., Priouzeau, F., Romero, G., & Mangialajo, L. (2023). The role of grazers in early-life stages of *Cystoseira* sensu lato can be crucial in the restoration of marine forests. *Frontiers in Marine Science*.
- [25] Javel, F., Thibaut, T., Grondin, J., Blanfuné-Thibaut, A., Delaye, M., Belmont, C. & Bizzozero, L. (2015). Programme GIREL, projet CYSTORE : Valorisation écologique d'infrastructures maritimes par transplantation d'algues du genre *Cystoseira*, bilan final et perspectives. Convention Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse – Safege (réf. 2014096 et 20140975), convention GPMM - Safege (réf. C1202413). Safege publ., 71 p. + ann..
- [26] Javel, F., Belmont, C., Blanfuné, A., Grondin, J. & Blin, E. (2018). Re-CYST : Projet pilote de restauration de ceintures de cystoseires dans le parc national des Calanques - Bilan final. Convention Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse – Métropole Aix-Marseille Provence. SUEZ Consulting publ., 46 p.
- [27] Javel, F. & Puissant, C., 2020. CYSTORE Port Vauban - Projet pilote de restauration écologique en milieu artificiel - Bilan final. Convention Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse n° 4096. SUEZ Consulting publ., 29 p.
- [28] Thibaut, T., Bottin, L., Aurelle, D., Boudouresque, C. F., Blanfuné, A., Verlaque, M., Pairaud, Y., Millet, B. (2016). Connectivity of populations of the seaweed *Cystoseira amentacea* within the Bay of Marseille (Mediterranean Sea): genetic structure and hydrodynamic connections. *Cryptogamie, Algologie*, 37(4), 233-255.
- [29] Medrano, A., Hereu, B., Cleminson, M., Pagès-Escolà, M., Rovira, G. L., Sola, J., & Linares, C. (2020). From marine deserts to algal beds: *Treptacantha elegans* revegetation to reverse stable degraded ecosystems inside and outside a No-Take marine reserve. *Restoration Ecology*, 28(3), 632-644.
- [30] Verdura, J., Sales, M., Ballesteros, E., Cefali, M. E., & Cebrian, E. (2018). Restoration of a canopy-forming alga based on recruitment enhancement: methods and long-term success assessment. *Frontiers in Plant Science*, 9, 1832.



- [31] Oksanen J, Blanchet FG, Kindt R, Legendre P, Minchin PR, O'hara RB, Simpson GL, Solymos P, Stevens MHH, Wagner H, Oksanen MJ (2018) Vegan: community ecology package. R Package Version 2, 4-6.
- [32] R Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- [33] Hothorn, T., Bretz, F., Westfall, P. (2008) Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical journal Biometrische Zeitschrift* 50(3) *Biom J*, : 346–363.
- [34] Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., Walker, S. (2015) Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. *Journal of Statistical Software* 67(1) American Statistical Association: 1–48.
- [35] Huvé, P. (1953). Étude expérimentale du peuplement de surfaces rocheuses immergées, en Méditerranée occidentale. *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'académie des sciences*, 236(4), 419-422.
- [36] Magurran, A. E. (2021). Measuring biological diversity. *Current Biology*, 31(19), R1174-R1177.
- [37] Gauff, R. P. M., Joubert, E., Curd, A., Carlier, A., Chavanon, F., Ravel, C., Bouchoucha, M. (2023). The elephant in the room: Introduced species also profit from refuge creation by artificial fish habitats. *Marine Environmental Research*, 185, 105859.
- [38] Schaefer N, Sedano F, Bishop MJ, Dunn K, Hank M, Yu KD, Zavoleas Y, Dafforn KA (2023). Facilitation of non-indigenous ascidian by marine eco-engineering interventions at an urban site. *Biofouling*, 39(1), 80-93.
- [39] Thibaut, T., Blanfuné, A., Boudouresque, C. F., Personnic, S., Ruitton, S., Ballesteros, E., Bellan-Santini, D., Nike Bianchi, C., Bussotti, S., Cebrian, E., Cheminée, A., Culioli J.-M., Derrien-Courtet, S., Guidetti, P., Harmelin-Vivien, M., Hereu, B., Morri, C., Poggiale J.-M., Verlaque, M. (2017). An ecosystem-based approach to assess the status of Mediterranean algae-dominated shallow rocky reefs. *Marine pollution bulletin*, 117(1-2), 311-329.

Auteur principal :

Felice Arena – arena@unirc.it – Natural Ocean Engineering Laboratory, DICEAM Dept., Mediterranean University of Reggio Calabria – Via Zehender - Loc. Feo di Vito 89123 Reggio Calabria – Italy

Co-auteurs :

Anita Santoro – anita.santoro@unirc.it – Wavenergy.it srl, Academic Spin-Off the Mediterranean University of Reggio Calabria - Via F. Baracca, trav. De Salvo, 8/b - 89123 Reggio Calabria – Italy

Vincenzo Fiamma – vincenzo.fiamma@unirc.it – Natural Ocean Engineering Laboratory, DICEAM Dept., Mediterranean University of Reggio Calabria – Via Zehender - Loc. Feo di Vito 89123 Reggio Calabria – Italy

Giovanni Malara – giovanni.malara@unirc.it – Natural Ocean Engineering Laboratory, DICEAM Dept., Mediterranean University of Reggio Calabria – Via Zehender - Loc. Feo di Vito 89123 Reggio Calabria – Italy

Valentina Laface – valentina.laface@unirc.it – Natural Ocean Engineering Laboratory, DICEAM Dept., Mediterranean University of Reggio Calabria – Via Zehender - Loc. Feo di Vito 89123 Reggio Calabria – Italy

Antonino Simone Spanò – antoninosimone.spano@unirc.it – Natural Ocean Engineering Laboratory, DICEAM Dept., Mediterranean University of Reggio Calabria – Via Zehender - Loc. Feo di Vito 89123 Reggio Calabria – Italy & University School for Advanced Studies IUSS Pavia – Italy

Elena Valentino – e.valentino@adsptirrenocentrale.it – Port System Authority of the Central Tyrrhenian Sea - via Roma, 29 - 84121, Salerno – Italy

Gianluigi Lalicata – g.lalicata@porto.salerno.it – Port System Authority of the Central Tyrrhenian Sea - via Roma, 29 - 84121, Salerno – Italy

Fausto Caputo – f.caputo@porto.salerno.it – Port System Authority of the Central Tyrrhenian Sea - via Roma, 29 - 84121, Salerno – Italy

Simona Ghiretti – simona.ghiretti@mit.gov.it – Ministry of sustainable infrastructure and mobility, Provv. Interr. Sicily-Calabria, Piazzale Porto, Reggio Calabria – Italy

Alessandra Romolo – aromolo@unirc.it – Natural Ocean Engineering Laboratory, DICEAM Dept., Mediterranean University of Reggio Calabria – Via Zehender - Loc. Feo di Vito 89123 Reggio Calabria – Italy

Key words : U-OWC, harbour, prototype, wave energy, green port.

The new U-Oscillating Water Column breakwater of the commercial harbour of Salerno for the wave energy conversion

Résumé de l'article: Cet article décrit les caractéristiques d'un brise-lames U-OWC (ou REWEC3), construit dans le port de Salerne (Italie) dans le cadre des travaux d'agrandissement des infrastructures préexistantes. L'aménagement modifié de l'infrastructure portuaire est présenté sur la Figure 1. Il montre que l'extrémité du brise-lames Ouest a été démolie sur une longueur d'environ 100 m, tandis que le brise-lames Est a été prolongé d'environ 180 m en adoptant des U-OWC.

Le brise-lames à caisson REWEC3 est composé d'une chambre contenant une colonne d'eau dans sa partie inférieure et une poche d'air dans sa partie supérieure. La poche d'air est reliée à l'atmosphère via un conduit abritant une turbine à air auto-rectifiante. De plus, un REWEC3

comprend un conduit vertical en forme de U pour relier la colonne d'eau à la mer (pour cette raison, il est également connu sous le nom de U-OWC). Le principe de fonctionnement du système est assez simple : par l'action des ondes incidentes, l'eau à l'intérieur du conduit en forme de U est soumise à un mouvement alternatif, qui induit alternativement une compression et une expansion de la poche d'air. La différence de pression entre la poche d'air et l'atmosphère est utilisée pour entraîner une turbine à air couplée à un générateur électrique du commerce connecté au réseau. La principale caractéristique de l'U-OWC est la possibilité de régler la période naturelle de la colonne d'eau afin de l'adapter à une période de vague souhaitée en fonction de la taille du conduit en U. Cette propriété introduit des améliorations substantielles utiles dans la perspective de l'exploitation de l'énergie des vagues de l'océan. En particulier, le nouveau brise-lames du port de Salerne est constitué de trois caissons U-OWC (les n° 2, 3 et 4 sur la Figure 2), chacun doté de dix chambres pneumatiques. La construction des caissons a été achevée en 2022, lorsqu'une activité de surveillance de trois chambres actives a commencé. Le suivi est finalisé pour apprécier le comportement en conditions réelles et évaluer les performances de l'installation du dispositif. Dans l'article, un aperçu général du dispositif U-OWC et de l'activité de surveillance des cellules actives est donné en conjonction avec les performances initiales attendues de l'usine U-OWC.

Article's abstract: This article describes the characteristics of a U-OWC (or REWEC3) breakwater, built in the Port of Salerno (Italy) within the enlargement works of the pre-existing infrastructures. The modified layout of the port infrastructure is shown in Figure 1. It shows that the end of the West breakwater has been demolished for a length of about 100 m, while the East breakwater has been extended of about 180 m by adopting U-OWCs.

The U-OWC caisson breakwater comprises a chamber containing a water column in its lower part and an air pocket in its upper part. The air pocket is connected to the atmosphere via a duct hosting a self-rectifying air turbine. In addition, it includes a vertical U-shaped duct for connecting the water column to the open sea (for this reason it is known also as U-OWC). The working principle of the system is quite simple: by the action of the incident waves, the water inside the U-shaped duct is subject to a reciprocating motion, which induces alternately a compression and an expansion of the air pocket. The pressure difference between the air pocket and the atmosphere is used to drive an air turbine coupled to an off-the-shelf electrical generator connected to the grid. The main feature of the U-OWC is the possibility of tuning the natural period of the water column in order to match a desired wave period by an appropriate design of the U-duct. This property introduces substantial improvements, which are useful from the perspective of wave energy exploitation.

The new breakwater in the Port of Salerno consists of three U-OWC caissons (the n° 2, 3 and 4 in Figure 2), each with ten pneumatic chambers. The building of the caissons has been completed in 2022 and it has been followed the monitoring of three active chambers. The objective of the monitoring is to assess the U-OWC behaviour in real conditions and to evaluate the performances of the plant. In the paper, a general overview of the U-OWC device and of monitoring activity is given in conjunction with an initial expected U-OWC plant performance.

Article :

1. Introduction

The REWEC3 [1] is an Oscillating Water Column (OWC) – type wave energy converter device embedded in a vertical breakwater. It is also known as U-OWC as its peculiar feature is the inclusion of a vertical U-shaped duct connecting the water column to the open sea, which allows attaining the resonance condition without phase control devices.

The U-OWC was tested in small scale field experiments at the Natural Ocean Engineering Laboratory of Reggio Calabria, as well as at full scale. The first full-scale chambers were built in the port of Civitavecchia (Rome, Italy) [2,3,4], where more than 100 chambers have been installed. Such plant, after the installation of the Power Take Off systems, could represent one of the largest wave energy farms worldwide available. It has been the very first installation of a full-scale U-OWC and the first OWC plant installed in the Mediterranean Sea. Currently, a new plant was constructed in the commercial Port of Salerno (Italy). The project, funded by the European Regional Development Fund (ERDF), aims at strengthening the accessibility of the port of Salerno by several improvements, briefly described in Section 2, where details on the plant are provided as well. Section 3 reports the construction phases of the plant and Section 4 presents the monitoring activity and some results of in situ measurements.

2. The commercial port of Salerno: the enlargement of the port entrance

The port of Salerno, located in the gulf of the Tyrrhenian Sea, is registered in the class of II category of seaports. It is one of the major domestic ports and plays an important role in the industrial and commercial system of the Central and South Italy. The Port of Salerno covers an area of 1,700,000 m², 500,000 m² of which on land, and it comprises 5 docks (Figure 1): Molo Ponente and Molo Levante, being the outer breakwaters protecting the harbour, Molo Trapezio, Molo 3 Gennaio and Molo Manfredi. In 2020, almost 26×10^6 tonnes of goods and more than 3 million passengers passed through the port. Since the traffic is supposed to increase in the future years, several improvements of the infrastructure have been planned. In this context, the widening of the port entrance has been carried out through the European Regional Development Fund (ERDF) “Grande Progetto: Logistica e Porti. Sistema Integrato” to allow access, transit, and docking of larger cruises, while ensuring safer manoeuvres and operative conditions in the port basin. In particular, the outer breakwater has been extended by 200 m (Figure 2),



Figure 1. The configuration of the Port of Salerno, red areas indicate the location of the works : the West breakwater was demolished for a length of about 100 m, while the East breakwater has been extended of about 180 m by adopting REWEC3 caissons

by including the REWEC3 plant so that it can be employed both for protection and for energy harvesting purposes. Four caissons have been constructed to extend the breakwater, three of which are REWEC3.

Each REWEC3 caisson comprises 10 active chambers, for a total number of 30 chambers to be equipped with the optimized PTO units. The three caissons have the same geometrical characteristics, i.e. 39.20m long and 22.50m wide, being the active part of the device characterized by the inner chamber and the vertical duct which width is 4m and 2m, respectively. The duct opening is located 2m below the m.w.l. and the water depth at the installation position is around 11.40m (Figure 3).

The height of the air pocket is 6m in still conditions and the air in the chamber is connected to the atmosphere via an opening with a diameter of 0.75 m. The active part was designed with the objective of maximizing the average annual energy absorbed by the plant by considering the specific wave climate conditions of the site. The passive part of the caisson, i.e. all the chambers apart from the U-duct and the inner chamber, comprises the stabilizing elements filled with sand and was designed for ensuring the global stability in extreme conditions.

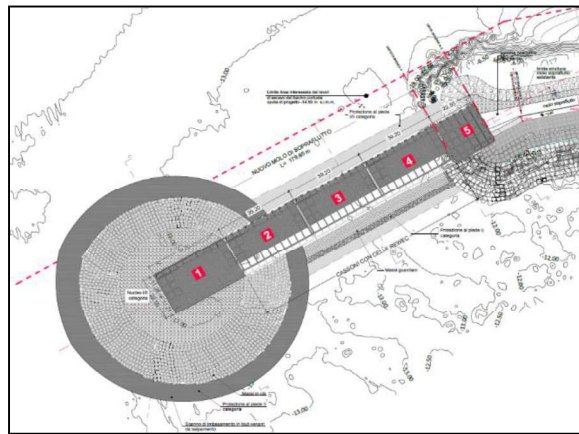


Figure 2. The enlargement of the outer breakwater: REWEC3 caissons are numbered 2,3,4.

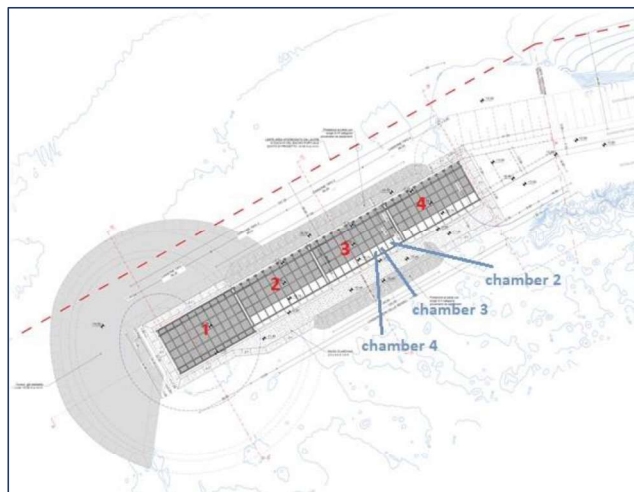


Figure 3. Cross-section of a REWEC3 caissons (the 2, 3 and 4 of Figure 2) in the Salerno's project, at the center of the breakwater.

3. The construction phase

Breakwaters are commonly realized through the following steps: first, the caissons are constructed up to a certain height above the m.w.l., then they are transported to the final position and sunk, finally the concrete structure is completed in place and all the ancillary works finalized to let the dock be operative.

In the case of Salerno, the concrete structure has been realized using the DARIO dry dock from Fincosit srl, from the base up to the level corresponding to +0.80m with respect to the m.w.l. (Figure). The caissons have been then moved to the final position (Figure) and, after their installation, the concrete structure has been finalized (Figure). The construction of the caissons started in January 2021 and the enlargement of the outer breakwater ended in April 2022. In the right panel of Figure 7, the REWEC3 caissons completed in situ are shown.



Figure 4. Construction of the concrete caisson up to +0.80m in the Dario dry dock.



Figure 5. Concrete structure transportation from the construction site to its final position.



Figure 6. Concrete structure finalization in place.

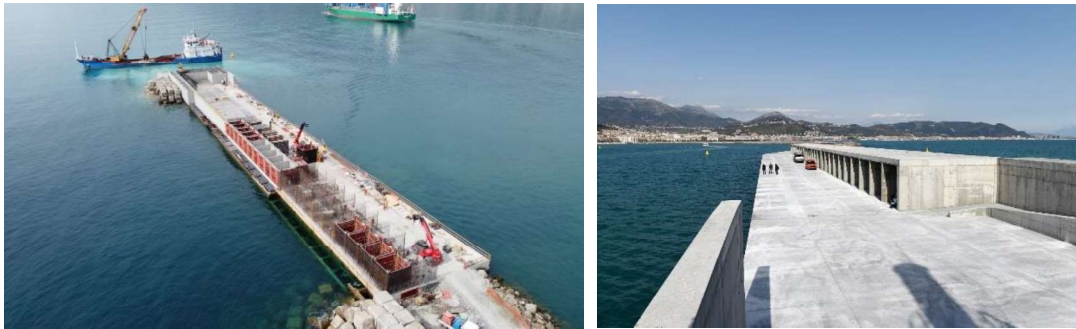


Figure 7. Final stage of the realization of the U-OWC breakwater.

4. Monitoring activity and initial results

To assess the behaviour in real conditions and to evaluate the performances of the plant a 1-year monitoring activity is planned. Data will be collected by pressure transducers and ultrasonic probes installed in three of the 30 active chambers corresponding to the centre of the enlargement (Figure 8), placed as shown in Figure. A brief description of the monitoring system is reported in Table 1.

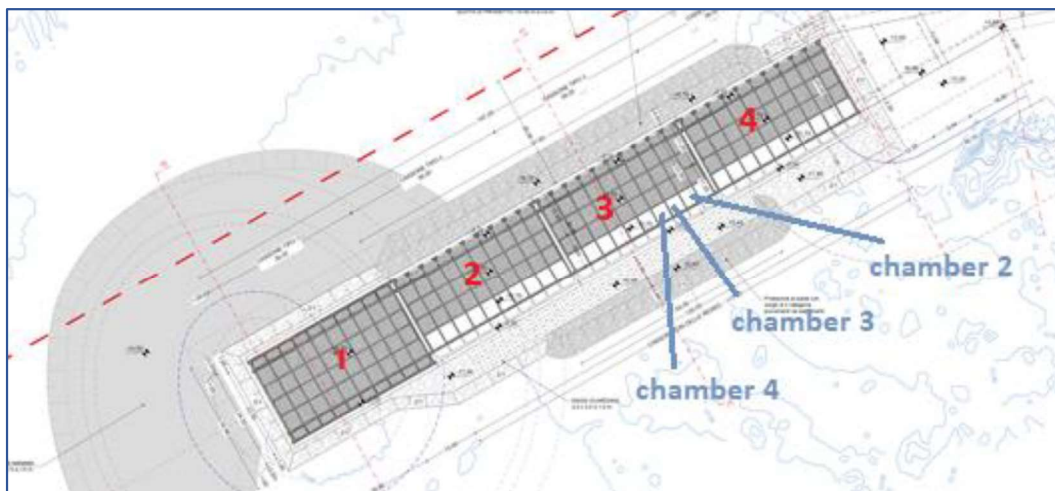


Figure 8. Chambers monitored (caisson number 3) corresponding to the centre of the enlargement.

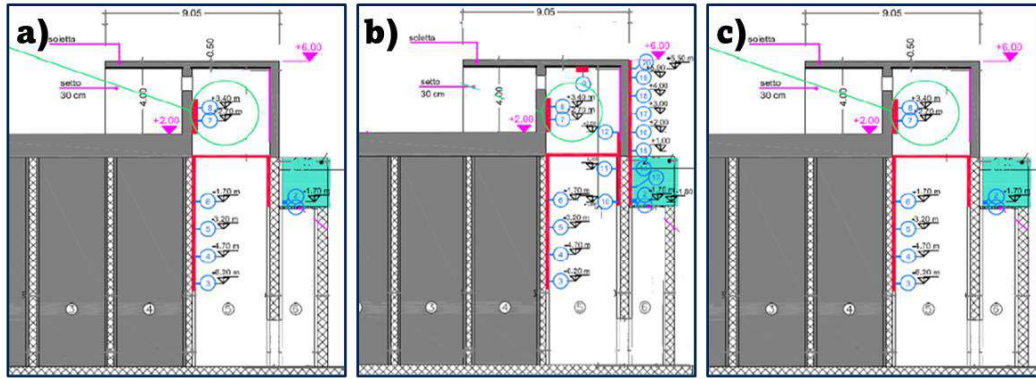


Figure 9. Position of the sensors installed: a) chamber n.1; b) chamber n.2; c) chamber n.3.

	Sensors employed	Position	Number of sensors
Chamber n.1	Pressure transducers	Inner chamber	5
		U-duct opening	2
Chamber n.2	Pressure transducers	Inner chamber	5
		U-duct opening	2
	Ultrasonic probe	Chamber external wall	8
Chamber n.3	Pressure transducers	Chamber roof	1
		Inner chamber	5
		U-duct opening	2

Table 1. Monitoring system: sensors installed.

All the sensors will be connected to the acquisition unit, placed in a control room realized in correspondence of the chamber n.3 and equipped with a workstation remotely accessible.

Thanks to the collected data the system dynamics can be described by considering the water column displacement and the air chamber pressure, by which the power absorbed by the plant and the power output that the system makes available to the turbine can be computed, allowing the design of an optimal PTO and the quantification of the energy-wise performances of the REWEC3 plant.

The monitoring activities of the REWEC3 pneumatic chamber were started from the beginning of 2023. The pressure transducers 2 provide a direct measure of the water levels at the outer opening of the REWEC3 chamber, that is the input of the system. The pressure transducers inside the pneumatic chambers (4-5) are used to monitor the water pressure of the water column inside the pneumatic chamber by providing an indirect measure of the water column displacement. Finally, the PT 8 give a direct measure of the air pressure inside the pneumatic chambers.

The average absorbed power, Φ_p , by the single REWEC3 chamber is estimated via the approach of Boccotti *et al.* [5] and Arena *et al.* [3-4]

$$\langle \Phi_p \rangle = -b_3 b_2 \frac{1}{T} \int_0^T \left[\Delta p + \frac{1}{2} \rho \dot{\xi}^2 \left(\frac{b_2}{b_1} \right) \right] \dot{\xi} dt, \quad (1)$$

where T is the record duration, Δp is the pressure due to the wave measured at the top of the U-shaped

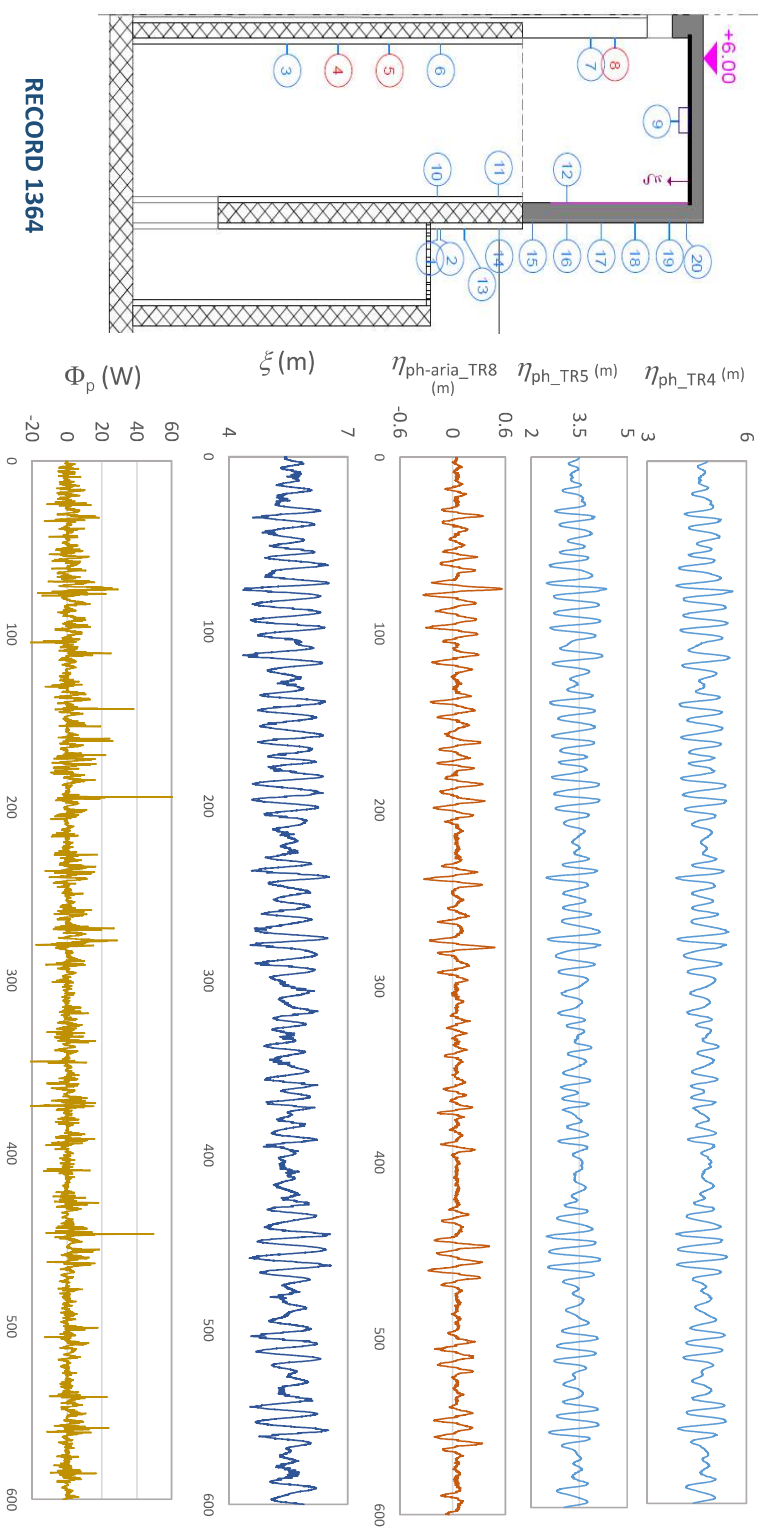


Figure 10. Time history : i) of the water pressure head (PT4 and 5) , ii) of the air pressure (PT8) inside the pneumatic chamber; iii) of the water elevation ξ , and of the iv) absorbed power, Φ_p inside the single REWEC3 pneumatic chamber in Salerno during record 1364

duct; ξ and $\dot{\xi}$ are, respectively, the displacement of the wave column inside the active chamber and its time derivative; b_1 is the width of the U-shaped duct; b_2 and b_3 are the width of the pneumatic chamber, in the longitudinal and transversal directions, respectively.

In Eq. (1) Δp can be measured directly by means of PT2, while the water elevation ξ inside the pneumatic chamber can be calculated indirectly from the direct measurement of the wave pressure of the water column (PT 4 and 5) and of the air inside the chamber (PT8), following the procedure described by [3,4,5]. In Figure 10 the time series of the recorded water pressure head (through PT 4 and 5) and of the air pressure (PT8) inside the pneumatic chamber are shown for the RECORD 1364. Moreover, the behaviour of the water elevation, ξ , inside the chamber of the calculated absorbed power, Φ_p , is provided.

Then, the fraction of wave energy absorbed by the system, that is the calculation of the REWEC3 system's absorption coefficient (in the literature the so-called capture width ratio), C_a , is estimated as

$$C_a = \frac{\langle \Phi_p \rangle}{\langle \Phi_{inc} \rangle}, \quad (2)$$

where $\langle \Phi_p \rangle$ is estimated via Eq. (1) and $\langle \Phi_{inc} \rangle$ is the average incident power per unit length of a wave front, in front of the REWEC3 breakwater in Salerno, which can be estimated by [6], as follows,

$$\langle \Phi_{inc} \rangle = \frac{\rho g^2}{64\pi} \alpha_{f_2} H_s^2 T_p, \quad (3)$$

H_s being the significant wave height in undisturbed wave field, T_p is the peak period, and α_{f_2} is a spectral parameter equal to 0.91 for mean JONSWAP spectrum and 0.86 for Pierson-Moskowitz spectrum.

For RECORD 1364 of Figure 10, the incident wave field is characterized by a significant wave height H_s equal to 1.25m and by a peak period equal to 5s. The estimated capture width ratio (2) under these conditions was greater than 0.86. From the results of the monitoring activity carried out in the full-scale plant in Salerno, it has been observed that the REWEC3 system can absorb on average from 60% to 98% of the incident wave energy for all conditions characterized by a significant height greater than 1m. The capture width ratio C_a factor is less than 0.5 only for 15% of the set of records analysed, having $H_s < 1m$.

5. Conclusions

A new REWEC3 plant is being realized in the port of Salerno. Thanks to the improvements needed to simplify the port accessibility and operations, the U-OWCs were embodied in the breakwater layout and 30 active chambers were constructed. The monitoring of the plant, started at the beginning of 2023, provided information about the plant behaviour in real conditions. The data and the results at full-scale

confirm the validity of the previsions provided in the design phase. Thanks to the monitoring activity outputs, a proper PTO will be designed, installed and tested to let the plant be operative in the next years.

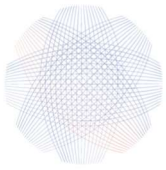
6. References

- [1] Boccotti, P. 2003. "On a new wave energy absorber", *Ocean Engineering*, 30(9), pp. 1191-1200.
- [2] Arena F., Romolo A., Malara G., Ascanelli A.. 2013. "On design and building of a U-OWC wave energy converter in the Mediterranean Sea: a case study". *Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013*, 2013, Nantes, France.
- [3] Arena, F, Romolo, A, Malara, G, Fiamma, V, & Laface, V. 2017. "The First Full Operative U-OWC Plants in the Port of Civitavecchia." *Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Volume 10: Ocean Renewable Energy. Trondheim, Norway. June 25–30, 2017.
- [4] Arena, F, Romolo, A, Malara, G, Fiamma, V, & Laface, V. 2018. "Response of the U-OWC Prototype Installed in the Civitavecchia Harbour." *Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Volume 10: Ocean Renewable Energy. Madrid, Spain. June 17–22, 2018.
- [5] Boccotti P., et al., 2007 "Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening-Part II: A small-scale field experiment", *Ocean Engineering*, 34(5-6), pp. 820-841.
- [6] Arena, F., Laface, V., Malara, G., Romolo, A., Viviano, A., Fiamma, V., Sannino, G., Carillo, A. 2015. Wave climate analysis for the design of wave energy harvesters in the Mediterranean Sea, *Renewable Energy*, Vol. 77, pp 125–141 - doi <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.002>



MEDITERRANEAN DAYS

by PIANC



13th meeting PORT OF THE FUTURE

Innovation Hub

by Cerema

ORGANIZED BY



EDITION 2023



WITH THE SUPPORT OF



HISTORICAL PARTNERS

