

# DIKWE : protection portuaire et énergie houlomotrice

Grégoire CORRE<sup>1</sup>, Quentin HENRY<sup>1</sup>, Philippe MAGALDI<sup>2</sup>, Timothée SANTAGOSTINI<sup>2</sup>, Gaspard FOURESTIER<sup>2</sup>, Marc LE BOULLUEC<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Groupe Legendre

<sup>2</sup> GEPS TECHNO

<sup>3</sup> IFREMER

**RESUME** Dans un contexte de changement climatique accentuant les phénomènes météorologiques extrêmes et imposant la nécessité d'une transition énergétique moins carbonée, le projet DIKWE développe une structure portuaire combinant les fonctions de protection face aux assauts de la houle et de production d'énergie houlomotrice. Ce projet a atteint un niveau de développement TRL6 grâce à un programme de recherche et développement mené par le Groupe Legendre et ses partenaires GEPS TECHNO et IFREMER. Ce programme a notamment démontré les performances de conversion énergétique du système utilisant un volet oscillant. Conçu pour répondre à des besoins structuraux et énergétiques des ports différents, la structure DIKWE est proposée comme un ouvrage neuf, en amont d'un ouvrage existant ou comme une structure rattachée sur une digue à talus existante. Les futurs travaux doivent montrer la capacité de déploiement à grande échelle de cette technologie.

**Mots-clefs** énergie houlomotrice, énergie des vagues, digue, protection portuaire, ports

## I. INTRODUCTION

### A. Contexte portuaire européen : infrastructures futures et existantes

Les ports jouent un rôle essentiel dans le développement économique des régions. Certains ports s'adaptent à de nouveaux usages (construction d'éoliennes offshore, augmentation de la capacité logistique des quais, etc.), quand d'autres ont cessé leur développement mais doivent entretenir leurs ouvrages existants afin de maintenir un niveau suffisant de protection pour les activités socioéconomiques locales. Ainsi, les besoins de construction et de rénovation sont constants.

Dans ce contexte, les digues sont des ouvrages indispensables permettant de protéger les eaux du port de l'agitation des vagues venant du large. La structure des digues se divise en deux familles principales : les digues à talus, et les caissons verticaux. Les digues à talus, composées d'un empilement d'enrochements ou de blocs en béton, sont souvent économiquement et techniquement plus intéressantes que les caissons verticaux, ouvrages en béton armé réfléchissant entièrement la houle. La solution en caissons verticaux devient cependant plus intéressante dans certains cas : lorsque la bathymétrie est élevée et que la solution digue à talus devient

géométriquement très consommatrice de matériaux ; et lorsque des contraintes d'accostage sont nécessaires, ce que ne permet pas une digue à talus.

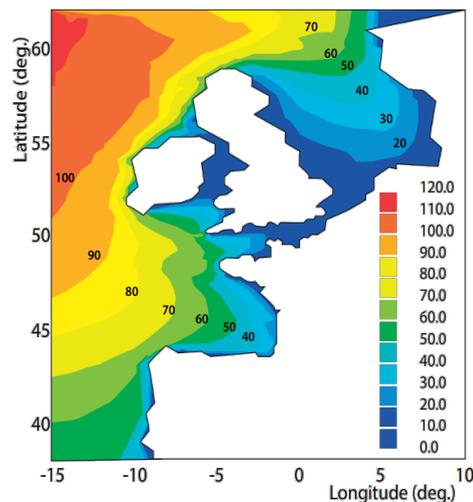
Le changement climatique menace les activités portuaires. Les infrastructures existantes doivent être renforcées afin de faire face aux futures conditions de houle. La plupart des digues ont été dimensionnées et construites pour une durée de vie de 50 ans. D'après la base de données de l'Université de Delft et HR Wallinford [1], plus de 74% des digues recensées en Europe auront plus de 50 ans en 2050. A cela s'ajoute l'augmentation du niveau des océans : le niveau moyen des océans a augmenté d'environ 10cm sur les 30 dernières années [2], ce qui pourrait conduire à une ruine précoce d'ouvrages dimensionnés pour des niveaux d'eau inférieurs.

En tant que consommateurs importants d'énergie, les ports cherchent également à opérer leur propre transition énergétique. L'intégration de technologies d'énergie renouvelable dans les infrastructures portuaires est une opportunité pour s'engager sur la voie de la décarbonation, et contribue à l'Onshore Power Supply (OPS). Cette technologie permet aux navires de se connecter directement au réseau électrique à quai, éteignant ainsi leurs moteurs auxiliaires, avec des bénéfices immédiats pour l'environnement et la santé publique.

Il existe donc des intérêts convergents pour le développement d'une structure combinant les fonctions de protection portuaire, en ouvrage neuf ou en renforcement d'ouvrages existantes, et de production d'électricité.

#### *B. Technologies de conversion d'énergie houlomotrices onshore et offshore, et leurs limites*

L'énergie houlomotrice est une source potentielle d'énergie renouvelable considérable et largement sous-utilisée aujourd'hui. Le potentiel énergétique des côtes nord et atlantique de l'Europe est estimé à environ 2,800 TWh/an [3], ce qui est équivalent à la production totale européenne d'électricité en 2021 [4]. Les côtes les plus exposées sont les côtes irlandaise et écossaises, ainsi que toute la façade portugaise (voir Figure 2).



**FIGURE 2. Puissance moyenne annuelle de la houle sur les côtes Ouest européennes en kW/m**

De nombreuses technologies permettent de récupérer l'énergie des vagues (*Wave Energy Converter*, WEC). Les classifications les plus courantes se font en fonction de la distance du système à la côte (onshore, nearshore ou offshore), et en fonction de la technologie de capture

utilisée. La Figure 3 présente les principales technologies existantes : (i) *Point absorber* : le plus souvent des bouées, indifférentes à la direction de propagation des vagues ; (ii) *Attenuator* : des corps flottants parallèles à la direction des vagues, convertissant le mouvement mécanique d'une rotule ; (iii) *Oscillating Water Column (OWC)* : une chambre dans laquelle l'eau pénètre et comprime ou aspire une masse d'air s'échappant par une turbine ; (iv) *Oscillating Wave Surge Converter (OWSC)* : volet oscillant autour d'un axe et mu par le mouvement des vagues ; (v) *Submerged pressure differential device (SPD)* : corps immergé, fixé au fond, et oscillant verticalement sous l'effet des différences de pression créées par les vagues ; (vi) *Overtopping device* : système à franchissement retenant l'eau dans un bassin puis la conduisant vers une turbine par gravité.

L'étude du rendement hydrodynamique de ces différentes technologies est l'objet de différentes études, qui s'accordent sur le rendement supérieur des systèmes à volet oscillant [5,6].

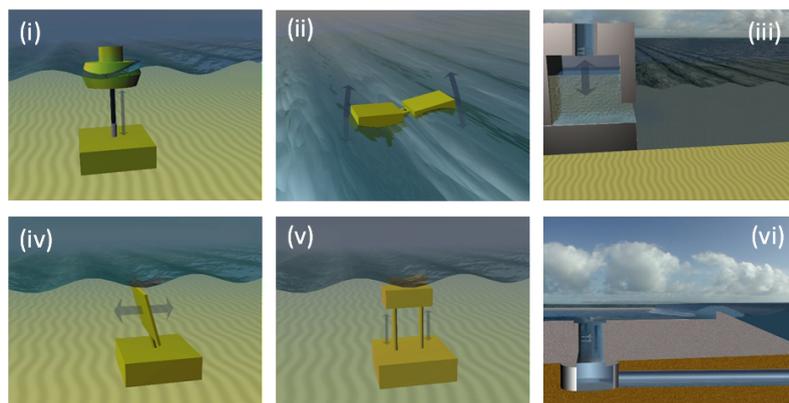


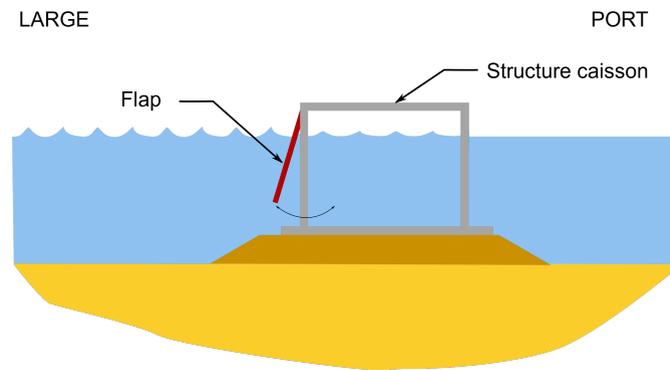
FIGURE 3. Technologies de capture d'énergie houlomotrice

## II. LA TECHNOLOGIE DIKWE

### A. La digue à énergie positive

L'énergie des vagues se brisant sur nos ouvrages portuaires le long de nos côtes est colossale. De cette observation est né le concept de DIKWE : DIKe Wave Energy. DIKWE s'inspire de la structure d'un caisson vertical. Le voile avant est remplacé par un volet oscillant (flap) dont l'axe est situé en haut (voir Figure 4). La houle incidente met en mouvement ce flap, dont les oscillations mécaniques sont ensuite transformées en électricité par un système de conversion hydraulique *Power Take-Off (PTO)*. Du point de vue économique, l'intérêt de combiner protection portuaire et production d'électricité est multiple [7] : répartition des coûts entre les deux fonctions, amortissement des coûts de génie civil par la production d'électricité, résistance du système houlomoteur bénéficiant de la rigidité de la digue, simplification des opérations de maintenance.

Le choix de la technologie de volet oscillant est motivé par les études de rendement énergétique citées précédemment : parmi toutes les technologies actuelles, ce système est celui offrant le rendement le plus élevée. L'axe est positionné en haut du flap pour des raisons de maintenance : les systèmes à flap oscillant OWSC ont généralement leur axe en bas, donc sous l'eau, ce qui rend les opérations maintenance des systèmes complexes et très coûteuses. Dans le cas de DIKWE, l'axe est toujours hors d'eau.



**FIGURE 4.** Système DIKWE, WEC à volet oscillant assurant la fonction de digue portuaire

Le voile arrière du caisson permet d'assurer la fonction de protection portuaire en stoppant totalement les vagues. Une structure réfléchissante appelée *jupe* (en référence aux jupes arrière de bateaux) est positionnée devant ce voile. Elle permet d'atteindre une résonance des mouvements des masses d'eau dans la structure et ainsi d'optimiser le rendement énergétique du système. La forme de cet élément a été elle-même optimisée dans ce but.

La digue est décomposée en « cellules », une cellule étant un système hydrodynamique autonome géométriquement situé derrière chaque flap. Afin d'assurer l'indépendance hydrodynamique de chaque cellule, celles-ci sont séparées par des parois empêchant les mouvements latéraux des vagues dans la structure.

La géométrie du caisson est adaptée aux conditions de houle du site : elle dépend de la longueur d'onde moyenne des vagues incidentes et est calculée afin de maximiser les oscillations des flaps. La hauteur de la structure est calculée de sorte que l'axe des flaps soient toujours positionnés au-dessus des niveaux d'eau maximaux. La position de la base de la structure dépend de la bathymétrie du site et de la hauteur choisie de l'assise. Enfin, la hauteur du flap est telle que le bas du flap est toujours immergé.

#### *B. Le programme de R&D*

Le projet DIKWE est porté par un consortium de trois entreprises : le Groupe Legendre dirige ce consortium et assure le dimensionnement structurel et la construction ; GEPS Techno [14], entreprise spécialisée dans les énergies marines, porte tous les calculs hydrodynamiques, le dimensionnement des organes techniques et les calculs de rendement énergétique ; l'IFREMER, institut français de recherche pour l'exploitation de la mer, est responsable des essais en bassin et de la diffusion scientifique du projet.

Consécutivement à une phase d'études préliminaires, un programme de recherche et développement, financé en partie par l'ADEME, fut mis en place. Ce programme se décompose en 3 temps :

- **DIKWE 1** : Phase d'études en bassin. Des simulations numériques aboutissent à une première conception d'un module DIKWE. Une campagne d'essai en bassin est réalisée sur une maquette à l'échelle 1/15 [8]. Les mesures réalisées fournissent des premières estimations de rendement énergétique et valide le fonctionnement hydromécanique du système.

- **DIKWE 2** : Phase d'essai en conditions réelles. Un prototype composé d'une cellule unique est implanté à Saint-Anne du Portzic (29) pendant 12 mois (voir Figure 5). Equipé d'un système PTO, il convertit l'énergie des vagues en électricité et fournit des valeurs plus précises de la performance énergétique de la technologie. Cette phase permet au projet d'atteindre un TRL6 (*Technology Readiness Level*).
- **Phase pilote** : Cette phase doit permettre de montrer la viabilité technique et économique de la technologie à l'échelle d'un projet pilote composé de plusieurs flaps. La démonstration de la capacité de déploiement est au centre de cette phase.

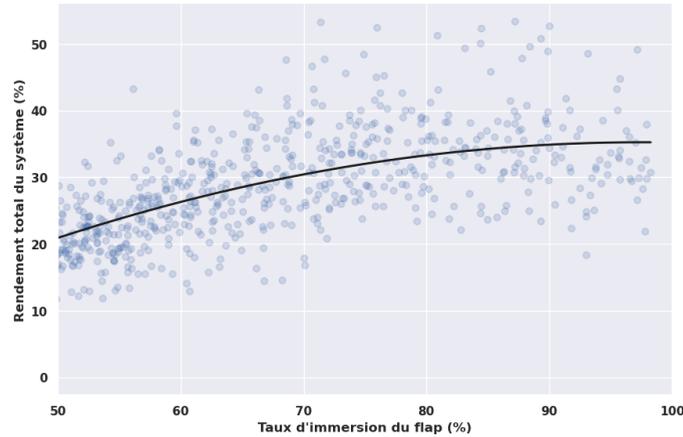


**FIGURE 5.** Prototype DIKWE 2 installé à Saint-Anne du Portzic durant l'année 2022

Les deux premières phases du programme ont été réalisées respectivement en 2020 et 2022.

### C. Résultats DIKWE 2

La seconde phase du projet avait pour objectif la consolidation des résultats préliminaires de rendement énergétique obtenus pendant la phase DIKWE 1. L'installation d'un PTO au niveau de l'axe du flap, convertissant ces oscillations en électricité, permet de mesurer le rendement hydrodynamique (ratio entre l'énergie de la vague incidente et l'énergie mécanique d'oscillation du flap), et le rendement total (ratio entre l'énergie de la vague incidente et l'énergie électrique produite) du système. La Figure 6 présente le rendement total mesuré en fonction du taux d'immersion du module. Les conditions favorables mesurées pendant cette période ont permis de mesurer des rendements totaux supérieurs à 30% et régulièrement supérieurs à 40%. Ces résultats ont permis de mesurer l'impact du remplissage de la cellule : le rendement augmente avec le niveau d'eau. Des dispositions géométriques simples (positionnement du module par rapport à la plus basse cote des eaux par exemple) nous permettent d'envisager un rendement de l'ordre de 30% pour les sites avec marnage. Les sites sans marnage ou à marnage faible permettent d'atteindre des rendements supérieurs.



**FIGURE 6. Rendement total en fonction du pourcentage d'immersion du module**

### III. UNE TECHNOLOGIE, DIFFERENTES CONFIGURATIONS

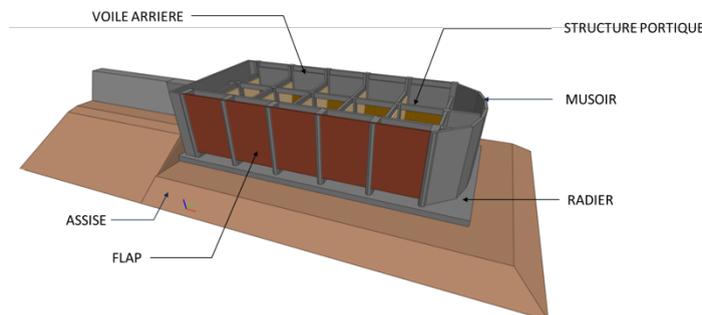
En fonction de leur position géographique et de leur situation économique, les besoins des autorités portuaires en infrastructure diffèrent :

- Extension des infrastructures pour augmenter la capacité logistique d'un port ou améliorer sa protection
- Rénovation et renforcement des infrastructures, dans un contexte de changement climatique
- Intégration d'énergies renouvelables dans son mix énergétique

La technologie DIKWE a été conçue comme une solution polyvalente répondant à ces différents besoins. Chaque situation étant associée à des contraintes géotechnique et structurelle spécifiques, des géométries différentes ont été conçues.

#### *Ouvrage neuf*

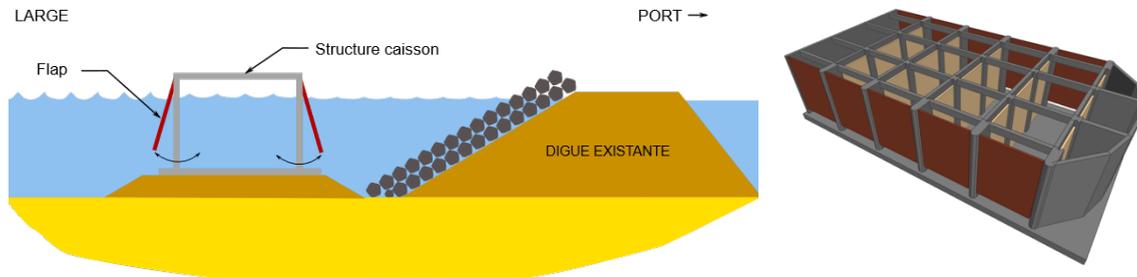
La construction d'une nouvelle digue ou son extension peut être requise par un besoin d'augmentation de la capacité logistique d'un port ou d'amélioration de sa protection de la houle extérieure. La digue DIKWE est construite à la façon d'un caisson traditionnel. La structure principale est composée d'éléments en béton armé. Le caisson repose sur un radier posé sur une assise en enrochements. Une trame poteaux-poutres compose la superstructure, raidissant la digue dans les deux directions horizontales.



**FIGURE 7. Structure d'une digue neuve DIKWE**

### *Protection d'un ouvrage existant*

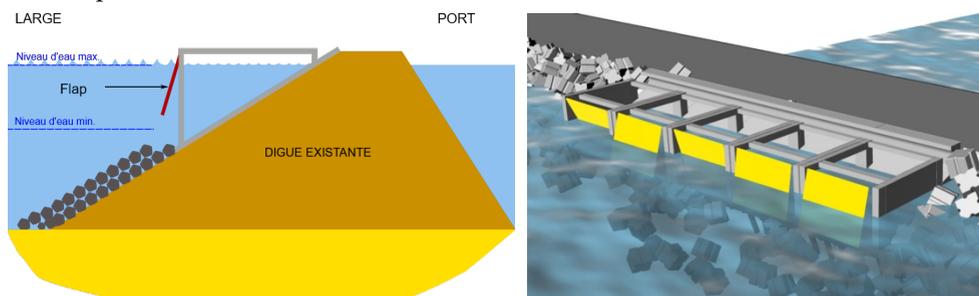
Le changement climatique provoquant une augmentation du niveau moyen des océans, et menant à une intensification des événements météorologiques extrêmes, les digues existantes souffriront de désordres plus fréquents et importants. Des désordres sont particulièrement observés sur les carapaces des digues à talus. Positionné devant un ouvrage existant, DIKWE agit comme un bouclier absorbant les efforts de houle (voir Figure 8). N'ayant plus le rôle de dernier rempart pour arrêter les vagues, un second flap est positionné à l'arrière de chaque cellule, augmentant ainsi le rendement énergétique de la solution.



**FIGURE 8. Structure DIKWE positionnée devant un ouvrage existant – Vues en coupe et 3D**

### *Intégration sur un ouvrage existant*

Afin de répondre au double besoin de renforcement d'une digue à talus et de production d'électricité, intégrer la structure DIKWE dans la carapace de la digue est une solution économiquement intéressante pour toutes les raisons évoquées dans la partie I : possibilité de réaliser l'ensemble des travaux depuis la terre, réduction des temps d'obtention des permis, coûts opérationnels de maintenance réduits, emprise au sol plus faible réduisant ainsi les impacts sur la faune et la flore environnante. La solution consiste à attacher les modules DIKWE à la structure de digue existante. Une surface plane étant nécessaire pour l'installation de la dalle inférieure des modules, la carapace est démontée depuis la crête. Selon la configuration du site, et basé sur des exemples d'intégration de WEC dans des digues [9-11], les modules sont ancrés à l'ouvrage existant par l'utilisation de micropieux, ou posés sur le fond et stables par gravité si la bathymétrie le permet.



**FIGURE 10. Structure DIKWE intégrée dans une digue existante – Vues en coupe et 3D**

## V. DIMENSIONNEMENT & CONSTRUCTION

### *Construction et phases opérationnelles*

Il est fréquent en génie maritime, et particulièrement dans la fabrication de caissons, que la phase opérationnelle ne soit pas la plus dimensionnante. Les phases de mise à l'eau et d'installation peuvent générer des sollicitations très importantes et guider le dimensionnement des structures. Les étapes suivies de la construction jusqu'à l'installation dépendent de la structure et du positionnement des modules DIKWE.

Les étapes sont similaires pour les deux premières situations où une structure indépendante est construite. Les phases suivies sont les suivantes :

- Construction des caissons
- Mise à l'eau
- Transport en flottaison
- Installation
- Phase opérationnelle

Dans la troisième situation, les modules sont placés sur une digue à talus existante. Si un accès terrestre est possible sur la crête de la digue, l'ensemble des opérations est réalisé depuis la terre. Les opérations sont les suivantes :

- Démontage de la carapace et de la sous-couche de la digue
- Protection du noyau de digue par une dalle béton
- Installation des modules par grue mobile et connexion à la dalle
- Phase opérationnelle

### *Dimensionnement*

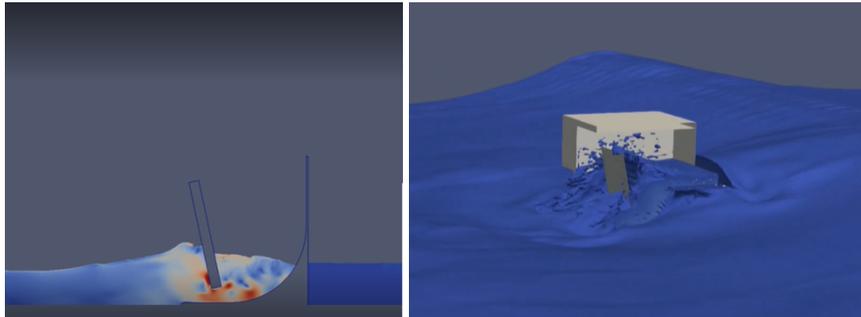
Le dimensionnement de la structure DIKWE suit les mêmes principes que celui d'un caisson traditionnel. Les principales vérifications sont les suivantes : vérification locale de la résistance des éléments aux efforts sollicitants ; vérification globale du glissement, renversement et de la capacité de portance du sol.

Le calcul des efforts de houle appliqués sur la structure est réalisé en combinant l'utilisation de la méthode analytique de Goda-Takahashi, et de méthodes numériques CFD (*Computational Fluid Dynamics*). La méthode de Goda, développée en 1974, et adaptée en 1994 par Takahashi [12,13] afin de prendre en compte les effets d'impact des vagues, permet de calculer analytiquement les efforts de la houle sur une structure verticale. Les oscillations du flap du système DIKWE, et la réflexion des vagues à l'intérieur des cellules en font un système hydrodynamique plus complexe qu'une paroi verticale immobile. L'existence de paramètres adimensionnels dans les équations de Goda-Takahashi permettent cependant de calibrer le modèle par comparaison à des calculs CFD effectués par GEPS TECHNO. La méthode analytique a permis de balayer un grand nombre de configurations (hauteur de vague, hauteur d'eau, période) afin d'identifier le scénario produisant les efforts les plus importants. Des calculs CFD, plus longs mais plus précis, ont validé par la suite

ce scénario et affiné les valeurs d'efforts. Pour résumer, le calcul des efforts maximaux suit les 3 étapes suivantes :

1. Calibration initiale des équations de GODA sur résultat CFD
2. Identification analytique du triplet  $(H, T, h)_{max}$  créant les efforts maximaux
3. Validation de cette configuration et recalcul des efforts maximaux par calculs CFD

Les éléments structuraux sont dimensionnés selon les normes Eurocodes. Un modèle éléments finis est construit dans le logiciel élément finis *Sofistik* afin de calculer les efforts dans les différents éléments. Les forces de houle sont appliquées sur la structure, deux situations étant considérées : l'action des vagues sur le flap, puis l'action des vagues sur l'arrière du module après propagation dans la cellule.



**FIGURE 11. Exemple de calcul CFD 2D (gauche) et 3D (droite) sur des structures DIKWE**

Les contraintes calculées permettent de vérifier le glissement et le renversement de la structure. Le même modèle est utilisé pour dimensionner les éléments durant les phases de construction et de transport, les éléments étant dimensionnés pour résister aux 3 phases de construction, transport et opérationnelle.

#### IV. CONCLUSION

L'impact du changement climatique sur les ports est double : structurel, avec le changement des conditions de houles et de vent, l'intensification des événements extrêmes et l'augmentation du niveau des eaux ; énergétique, avec la nécessité des ports d'effectuer leur transition énergétique vers des mix moins carbonés. Combiné au besoin d'extension de certains ports, ce contexte est favorable au développement de la solution DIKWE, combinant protection portuaire et production d'électricité.

Débuté en 2019, le programme de R&D de DIKWE a permis de valider les performances énergétiques du système, avec des rendements moyens autour de 30%. Déclinée en 3 géométries, la technologie permet de répondre à des besoins différents des ports : construction d'une digue neuve, construction d'une digue en bouclier pour la protection d'un ouvrage existant endommagé, et intégration de modules sur des digues à talus lors de travaux de rénovation.

La combinaison des fonctions de protection et de production d'énergie est la clé économique du projet, là où de nombreux projets houlomoteurs peinent à trouver le bon modèle économique. Il permet de diviser les coûts entre le génie civil et la production électrique, de simplifier les

opérations de maintenance et d'augmenter la résistance et la survivabilité du système houlomoteur en l'intégrant dans une structure solide et ancrée.

La technologie DIKWE est conçue pour répondre à des besoins énergétiques et structuraux différents, et les futurs travaux doivent prouver son adaptabilité à la grande majorité des ports européens.

## REFERENCES

- [1] N.W.H. Allsop, R.S. Cork & H. Jan Verhagen (2009), A Database of Major Breakwaters Around the World. *Coasts, Marine Structures and Breakwater 2009*. <https://doi.org/10.1680/cmsb.41318.0064>
- [2] <https://marine.copernicus.eu/ocean-climate-portal/sea-level>
- [3] A. Lewis, S. Estefen, J. Huckerby, W. Musial, T. Pontes, J. Torres-Martinez (2011). Ocean Energy. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*.
- [4] [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity\\_production,\\_consumption\\_and\\_market\\_overview#Electricity\\_generation](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_production,_consumption_and_market_overview#Electricity_generation)
- [5] A. Babarit & J. Todalshaug (2011). On the Maximum and Actual Capture Width Ratio of Wave Energy Converters, *9th European Wave and Tidal Energy Conference*
- [6] CEREMA (2020), Systèmes Houlomoteurs Bord à Quai, Guide de Conception en Phase Avant-projet, <https://www.emacop.fr/guide-systemes-houlomoteurs-bords-quai/>
- [7] M.A. Mustapa, O.B. Yaakob, Y. M. Ahmed, C.-K. Rheem, K.K. Koh, F. A. Adnan (2017), Wave energy device and breakwater integration: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.110>
- [8] M. Le Boulluec (2020), Projet DIKWE – Essais en bassin. Campagne d'essais à l'échelle 1/15. REM/URDT/LCSM 20-197
- [9] P. Contestabile, F. Vincenzo, E. Di Lauro, D. Vicinanza (2017), Full-Scale Prototype of an Overtopping Breakwater for Wave Energy Conversion, *Coastal Structures*, <https://doi.org/10.9753/icce.v35.structures.12>
- [10] G. Palma, P. Contestabile, B. Zanuttigh, S. M. Formentin, D. Vicinanza (2020), Integrated assessment of the hydraulic and structural performance of the OBREC device in the Gulf of Naples, Italy, *Applied Ocean Research*, <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102217>
- [11] K. Kim, B. Nam, S. Park, J. Kim, G. Kim, C. Lim, K. Hong (2018). Initial Design of OWC WEC Applicable to Breakwater in Remote Islands, *4th Asian Wave and Tidal Energy Conference (AWTEC), Taipei, Taiwan*.

[12] Y. Goda, New Wave Pressure Formulae for Composite Breakwaters (1974), *Proceedings of 14<sup>th</sup> Conference on Coastal Engineering*. <https://doi.org/10.9753/icce.v14.100>

[13] Y. Goda, Random Seas and Design of Maritime Structures (2009), *3rd ed.*; World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.: Singapore.

[14] <https://geps-techno.com/>