



PROPOSITION DE NOUVELLES CONCEPTIONS POUR LE DÉVELOPPEMENT ET L'AMÉLIORATION DES OUVRAGES PORTUAIRES DE PROTECTION ET D'ACCOSTAGE

Smail GABI¹, Ali BELAKROUF², Lylia DEGHOUL¹, Michael DOUBROVSKY³

¹ Département de Génie Civil, Université de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou, Algérie.
gabismail@yahoo.com

² Département de Génie Civil, Université de Boumerdes, Boumerdes, Algérie.

³ Sea River Ports and Waterways Department, Odessa National Maritime University, Odessa 65029, Ukraine.

1. INTRODUCTION

Un port est un lieu d'échange commercial de grande envergure qui se développe rapidement. Le rendement de ces échanges est directement lié à la conception des principales structures du port. Ces structures, de protection (les digues) et d'accostage (les quais) doivent pouvoir s'adapter aussi bien aux nouvelles conditions de manutention du fret (augmentation des charges d'exploitation, amélioration des techniques et des moyens mécaniques de manutention, etc.), qu'aux exigences environnementales.

Les ouvrages portuaires, tels que conçus traditionnellement, offrent peu de flexibilité aux changements des conditions d'exploitation, et leur adaptation à ces conditions est difficile, voire impossible, ou peu économique. C'est pour cette raison, que de nouvelles approches de conception

d'ouvrages de protection des ports ou d'accostage des navires sont présentées dans cette étude. Toutes ces propositions ont fait l'objet d'une étude expérimentale ou d'une modélisation, et certaines d'entre elles ont même été réalisées en Russie et en Ukraine.

2. LES OUVRAGES POIDS

Actuellement, les principaux ouvrages portuaires sur sol de bonne portance sont de type gravitaire. De tels ouvrages en maçonnerie construits avec des blocs très lourds en béton, de forme parallélépipédique sont mis en place suivant deux procédés différents : le premier est une disposition des blocs par couches horizontales, qui permet d'avoir une répartition uniforme des contraintes et donc un tassement

régulier de la fondation de l'ouvrage. Le second présente une élévation des blocs par colonnes verticales, plus facile à ériger, mais qui peut engendrer un tassement différentiel d'une colonne de blocs arrimés par rapport à une colonne voisine [1].

On propose dans ce qui suit de nouveaux modèles très avantageux d'ouvrages portuaires en maçonnerie. L'un de ces modèles est réalisé avec des blocs de forme trapézoïdale placés en colonnes. Les blocs de chaque colonne se contactent entre eux par la petite ou la grande base. Les blocs des colonnes voisines se contactent par les côtés inclinés et parallèles des trapèzes. L'ensemble de l'ouvrage repose sur un soubassement en enrochement, qui s'appuie à son tour sur une couche de matériau filtrant (figure 1). Contrairement aux ouvrages traditionnels érigés en colonnes de blocs rectangulaires, les ouvrages en blocs trapézoïdaux ne subissent pas de tassement différentiel. En effet, un bloc de cette nouvelle structure soumis à l'action d'une charge verticale transmettra cette charge non seulement au bloc immédiatement au dessous, mais aussi aux blocs des colonnes voisines par l'intermédiaire des côtés inclinés des trapèzes. Cette transmission de la charge va se poursuivre de bloc en bloc et de colonne en colonne jusqu'à ce qu'elle atteigne les blocs à la base de l'ouvrage et s'atténuer [2,3].

Quant à la section transversale des blocs, elle peut être rectangulaire ou trapézoïdale (figure 2).

Ce nouveau type d'ouvrage en blocs trapézoïdaux a été réalisé sur un des ports ukrainiens en mer noire, où on a

constaté une économie de matériaux de construction et une réduction des délais de réalisation [2].

Le calcul d'une telle construction peut être réalisé par la méthode des éléments finis en utilisant des éléments spéciaux, prenant en considération la forme originale des blocs et la particularité de leur interaction.

Dans le cas d'une digue de protection réalisée avec ces mêmes blocs, il est recommandé de prévoir deux types de blocs trapézoïdaux, les uns plus courts que les autres, c'est-à-dire $H_1 < H_2$ (figure 3). Les blocs courts seront mis en place en disposant leur petite base vers le bas. Il se forme ainsi des ouvertures entre les blocs de la structure très favorables à la dissipation de l'énergie de la houle.

Une autre approche assurant une bonne répartition des contraintes entre les éléments blocs de la structure est décrite ci-dessous. Le quai représenté sur la figure 4 est composé d'un soubassement en enrochement, d'une structure de blocs raccordés et d'une plate-forme. Les blocs sont fournis avec des trous, d'axe horizontal parallèle à l'axe longitudinal de la structure, et traverse les centres de gravité des blocs. Des éléments cylindriques rigides passent à travers les trous de plusieurs blocs adjacents, et les raccordent ainsi en des unités de grande taille (blocs raccordés).

Les éléments cylindriques de connexion ont pour rôle d'absorber les charges de flexion créées lors de l'assemblage des unités, ou lorsqu'il se produit des tassements différentiels entre les blocs, durant l'exploitation de l'ouvrage. Dans ce cas, les éléments cylindriques maintiennent les blocs et répartissent uniformément les charges entre eux.

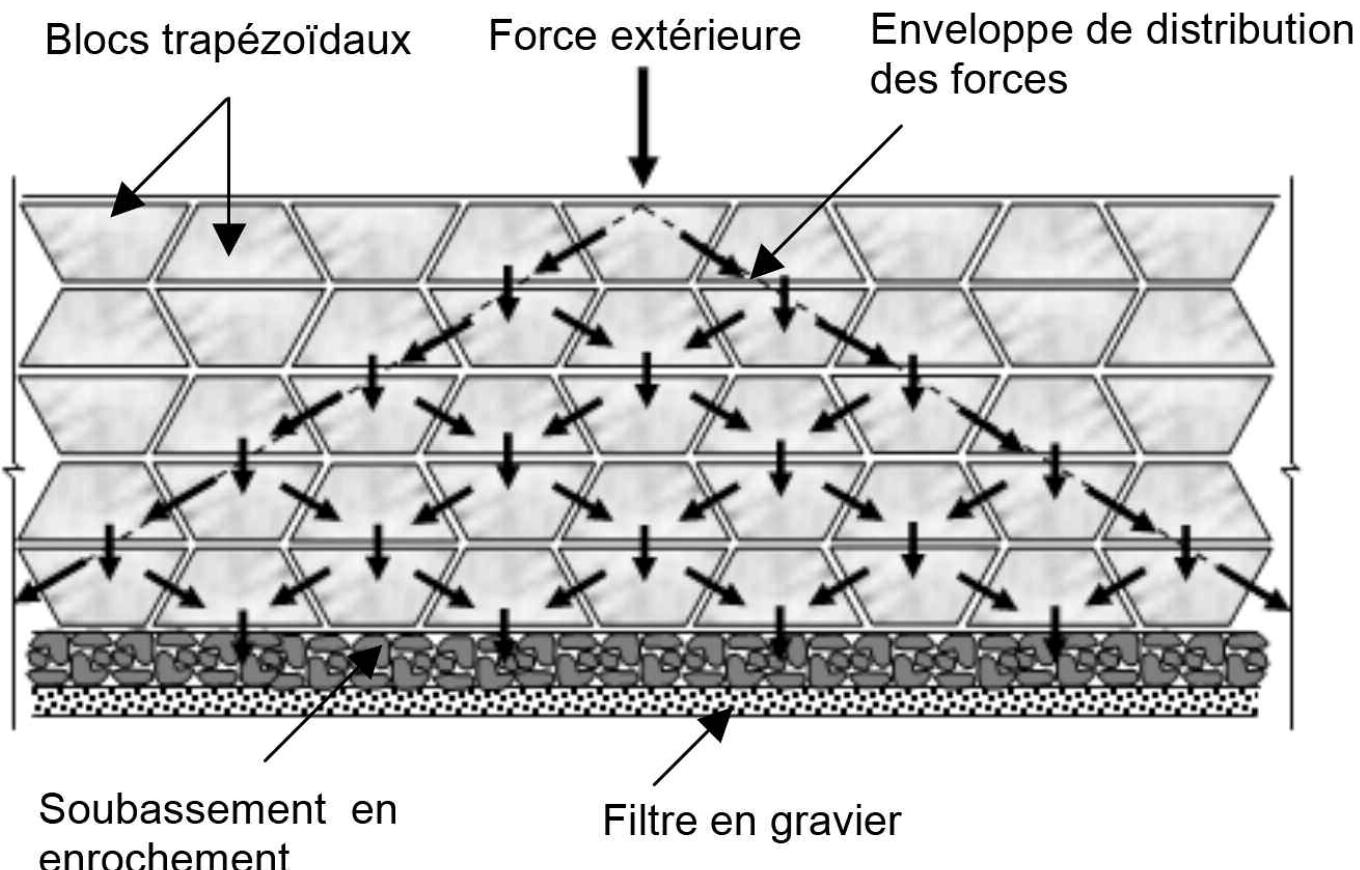


Figure 1 : Quai constitué de blocs trapézoïdaux et distribution des forces.

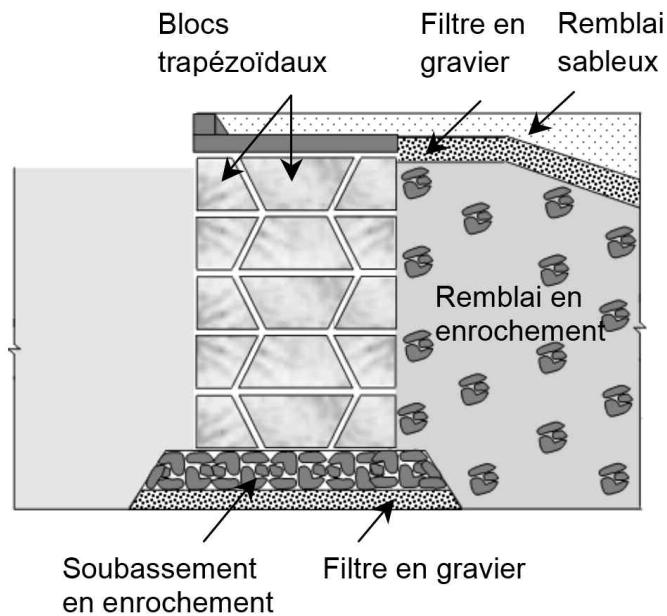


Figure 2 : Coupe transversale du quai.

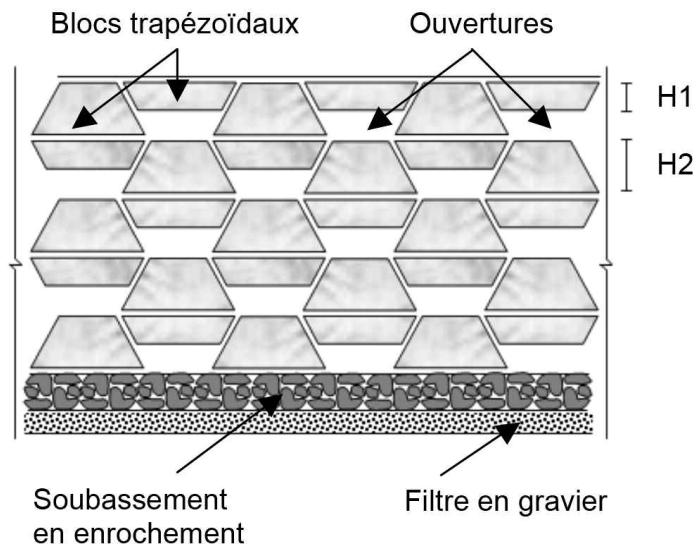


Figure 3 : Vue de face d'un brise-lames.

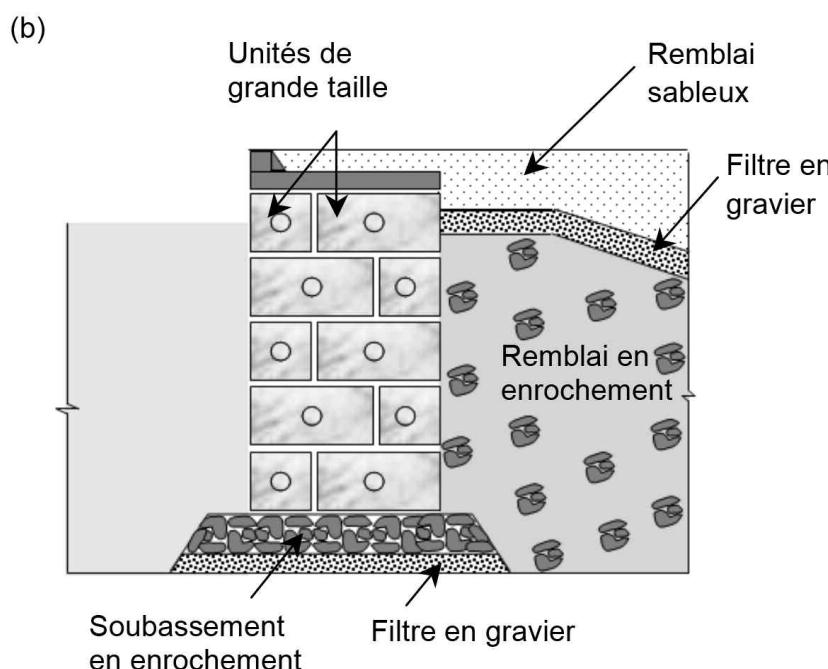
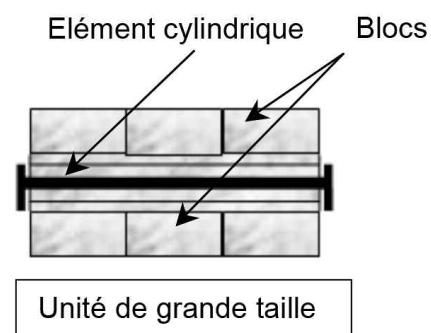
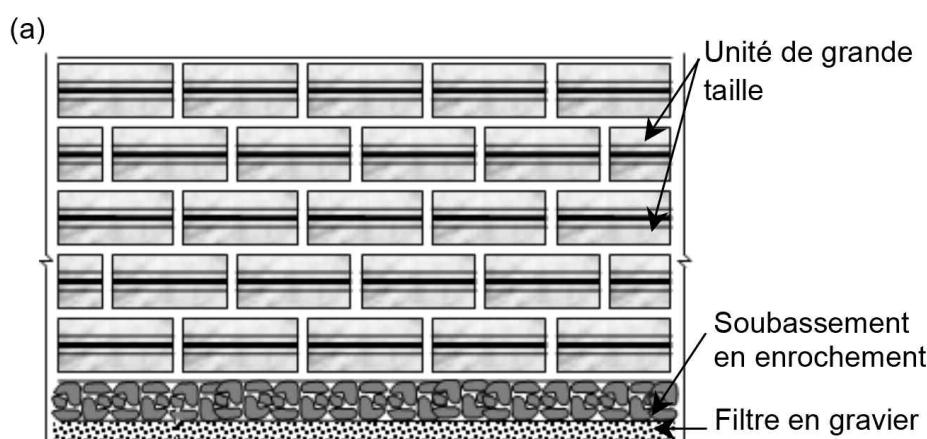


Figure 4 : Quai constitué d'unités de grande taille : (a) vue de face ; (b) section-transversale.



Par conséquent, les contraintes sur l'assise d'enrochement et sur le sol de fondation seront mieux réparties. Ceci conduit à une réduction de l'épaisseur des assises de fondation et permet d'accélérer la mise en place de la structure. Dans certains cas, la construction d'une structure gravitaire nécessite l'emploi d'équipements de levage lourds et puissants pour mettre en place les éléments de la structure. Cette situation est d'autant plus contraignante pour les ouvrages portuaires soumis aux actions de la houle et des courants, et ne reste pas sans effet sur les coûts de réalisation.

Afin de parer à ces difficultés, on a établi une structure originale de soutènement en forme de cale triangulaire (figure 5). Le côté intérieur de cette cale est incliné sur la verticale d'un angle β sensiblement égal à l'angle de rupture du sol. Ce qui facilite considérablement l'enfoncement de la structure dans le sol.

Par ailleurs, il y a lieu de procéder à un dragage suffisant du fond marin au pied de la cale, réduisant ainsi la résistance du sol à l'abaissement de la structure constituée de blocs de forme trapézoïdale. Chaque bloc de cette structure, après avoir servi lui-même de cale, est mis en place au fur et à mesure que les blocs précédents s'enfoncent dans le sol sous l'effet de leur poids propre.

Ce procédé de construction a été expérimenté en laboratoire sur un modèle réduit d'une hauteur d'environ 50 cm et à échelle grandeur nature, utilisant un mur de 3 m de haut. Il a été montré qu'une telle structure est très avantageuse dans le cas d'un sol de fondation homogène.

3. LES STRUCTURES EN PALPLANCHES

Dans le cas de mauvais sols de fondation, les ouvrages portuaires sont généralement supportés par des pieux ou utilisent des palplanches. Dans le cas où les charges extérieures appliquées sont élevées, la rigidité et la capacité portante des pieux supports ou des palplanches habituelles restent insuffisantes. Parfois, il se produit un risque de rupture ou une réduction non justifiée du taux de transbordement, et par conséquent une réduction du taux d'échange des postes

d'amarrage des quais ou des jetées. À ce propos, de nouvelles solutions effectives dans la construction et la modernisation des ouvrages maritimes ont été recommandées dans les travaux [2-4].

Certaines structures portuaires comportent comme principaux éléments porteurs des murs en palplanches qui absorbent la pression des sols. La conception actuelle de ces murs utilise des palplanches métalliques ou en béton armé ; le champ d'utilisation de telles constructions est limité par la capacité portante des palplanches utilisées [1].

Les figures 6a et 6b illustrent deux modes de conception d'un mur de palplanches avec ancrage. Les palplanches 1 de section curviligne en forme de demi-anneau sont disposées en S et sont alternativement ancrées avec un dispositif d'ancrage comprenant un câble 2 et une plaque d'ancrage 3. Dans le premier cas, aux extrémités des demi-anneaux en béton armé sont raccordés des panneaux verticaux 4 terminés par un dispositif de fermeture 5. Dans le second cas, les dispositifs de fermeture sont liés aux demi-anneaux et les panneaux verticaux s'articulent à eux. Dans les deux cas, les demi-anneaux sont alternativement symétriques par rapport à l'axe du mur 6 ; les panneaux verticaux peuvent être métalliques ou réalisés en béton armé. Les demi-anneaux en béton armé sont fabriqués en utilisant les mêmes équipements standard de réalisation de pieux tubulaires, prenant le soin de placer dans le moule un séparateur longitudinal qui partagerait le pieu en deux parties égales après le processus de centrifugation.

En faisant varier la dimension normale à l'axe 6 du panneau 5, il est possible de faire varier dans un large spectre, les principales caractéristiques géométriques de la section transversale du mur de palplanches, dont le moment d'inertie et le module de flexion.

Une analyse comparative des caractéristiques géométriques des sections des palplanches classiques utilisées dans les travaux maritimes avec les caractéristiques des sections proposées, met en évidence d'innombrables possibilités de ces dernières à amortir les efforts extérieurs. Ainsi, un mur de palplanche incorporant des panneaux verticaux entre les deux demi-anneaux (fig. 6b) permet d'augmenter les caractéristiques géométriques de la section considérée jusqu'à 4-5 fois.

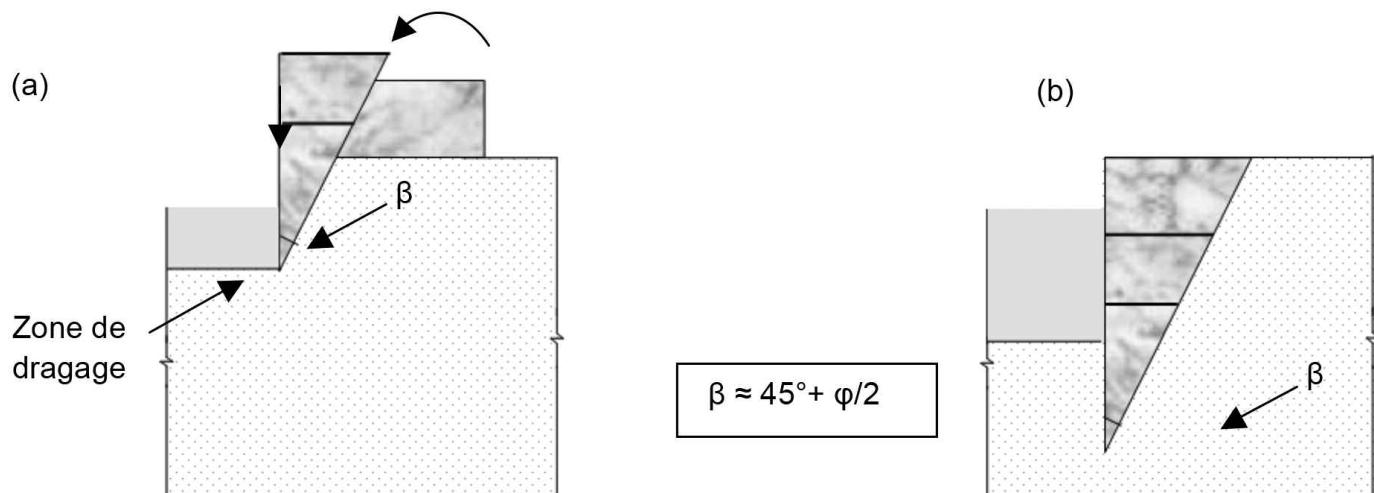
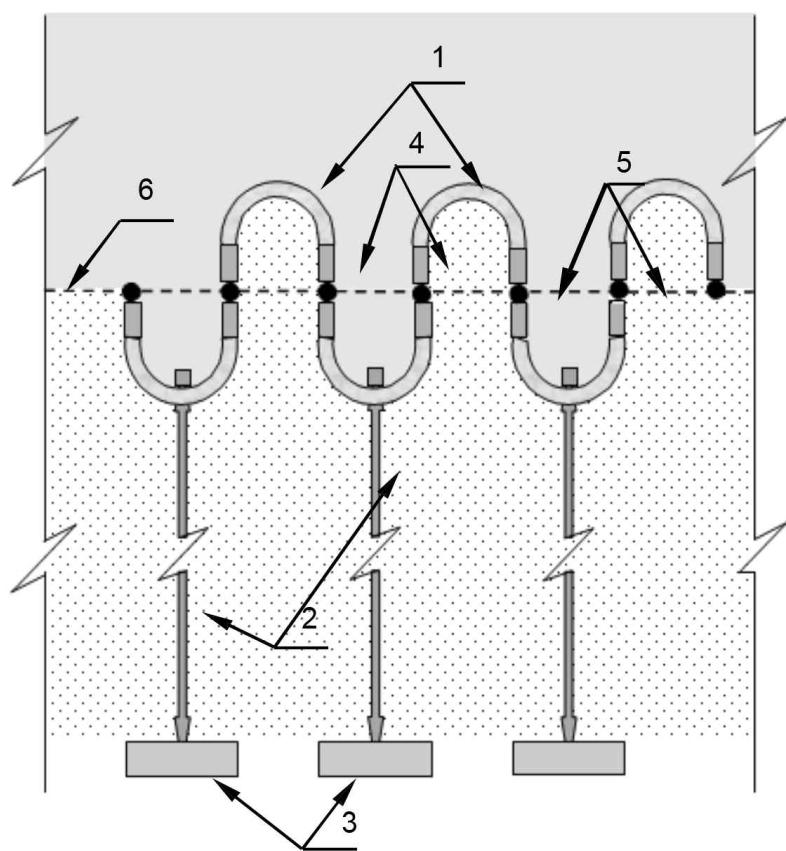


Figure 5 : Structure de quai en forme de cale.



(a)



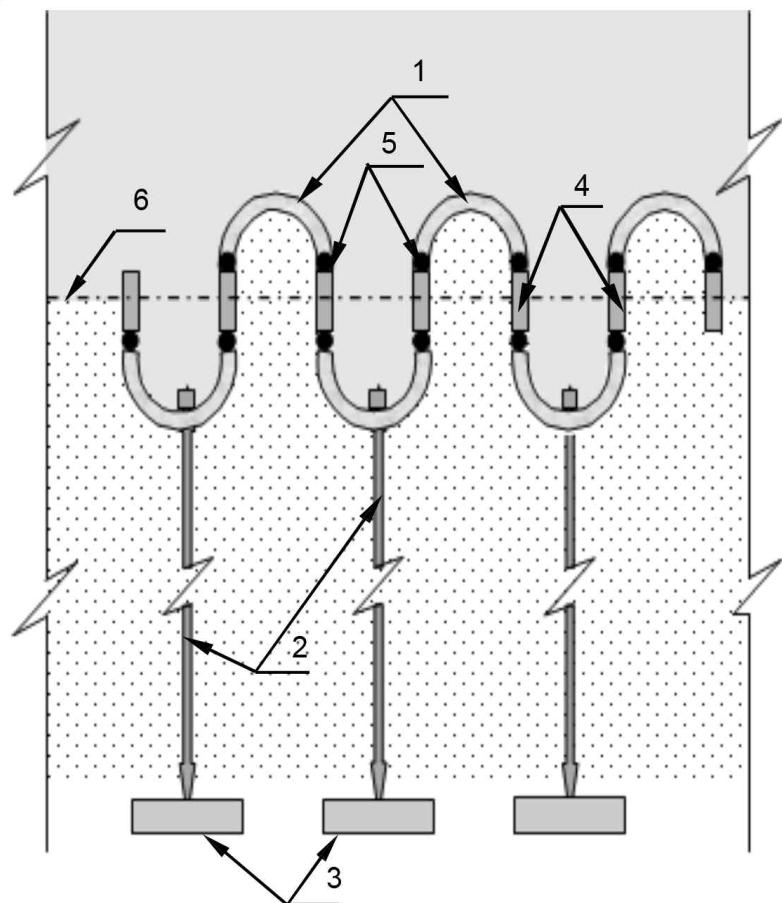
(c)



(d)



(b)



(e)

**Figure 6 : Murs en palplanches.**

Tandis qu'un mur de palplanche réalisé en demi-anneaux en béton armé sans panneaux verticaux entre eux (figure 6c) assure une augmentation de ces mêmes caractéristiques de 10 fois plus que celle correspondant à une section classique, de type Larsen, par exemple.

Les sections curvilignes des palplanches en demi-anneaux peuvent être non seulement en béton armé, mais aussi métalliques avec des dispositifs de fermeture soudés à leurs extrémités.

Théoriquement, le diagramme du moment fléchissant pour un mur très rigide en palplanches est soit entièrement positif, soit entièrement négatif. Par conséquent, prenant en considération la poussée latérale du remblai derrière le mur, le matériau des palplanches se situant d'un côté de l'axe neutre du mur sera tendu, et celui de l'autre côté sera comprimé.

C'est pour cette raison, qu'il est avantageux de disposer les palplanches de matériaux différents de part et d'autre de l'axe neutre du mur. Ainsi, les éléments du côté du remblai peuvent être réalisés avec un matériau de bonne résistance à la compression (le béton armé, par exemple), et les éléments du côté opposé de l'axe du mur avec un matériau travaillant à la traction (le béton précontraint (figure 6d), ou le métal (figure 6e)). Une telle solution permet d'optimiser l'utilisation de la capacité portante de chaque élément de la structure et de réduire la consommation en matériaux.

Aussi, à titre de comparaison avec les murs en palplanches classiques, les murs en palplanches en demi-anneaux sont meilleurs que ces derniers à bien des égards :

- En faisant varier la dimension du panneau vertical, il est possible de changer le moment résistant du mur et de l'optimiser en fonction des charges extérieures appliquées ;
- Les dispositifs de fermeture assurent une grande fiabilité de jonction entre les palplanches ;
- La disposition des palplanches en forme de S augmente la section transversale du mur de palplanches. Les palplanches du côté mer peuvent être utilisées pour soutenir la plate-forme de la structure, et les palplanches arrières peuvent être employés comme des appuis pour les engins de manutention ;
- Dans les sols de faible résistance, les palplanches en demi-anneaux sont enfoncées plus facilement que les palplanches ou pieux tubulaires, du fait que l'obturation à leur extrémité inférieure est faible.

4. LES STRUCTURES MIXTES GRAVITÉ-PIEUX

Comme les sols de fondation de mauvaise qualité limitent l'utilisation des structures gravité, la présence de charges latérales élevées limite le domaine d'application des structures sur pieux. C'est dans cet ordre d'idée qu'on pourra proposer de concevoir des ouvrages mixtes gravité-pieux, notamment pour les ouvrages maritimes, où les charges sont souvent élevées, que ce soit les charges dues au poids des ouvrages, que celles latérales dues à la poussée des terres, de l'eau ou des embarcations.

Dans le cas de ces ouvrages mixtes, la partie gravitaire de la structure fournit la stabilité, tandis que les pieux transmettent les charges externes aux couches profondes de bonne capacité portante.

La digue représentée sur la figure 7 a été conçue pour des ports en eau profonde et pour des vagues importantes. Cette structure originale a été construite au port de Novorossiysk (Russie). Le système de pieux 1 composé de tubes en acier d'un diamètre de 1020 mm, a été enfoncé avec une inclinaison de 3/1. Les pieux sont liés par une structure de coiffe 2, et la protection de la digue est assurée par deux carapaces composées de dalles en béton armé 3 de plus de 300 t et par un système de poutres transversales 4. Le noyau 5 de la digue constitué d'enrochements et le soubassement 6 réalisé avec un mélange de sable et de galet reposent sur un sol naturel silteux 7 traversé par les pieux jusqu'au substratum [4].

Cette structure a subi l'assaut de plusieurs grandes tempêtes, et il n'a pas été constaté de dommages sérieux, de déformations ou autres problèmes essentiels mettant en cause sa stabilité et sa sécurité. En plus, l'élancement de cette conception par rapport à la digue à talus classique, permet de réduire le volume des matériaux à mettre en place.

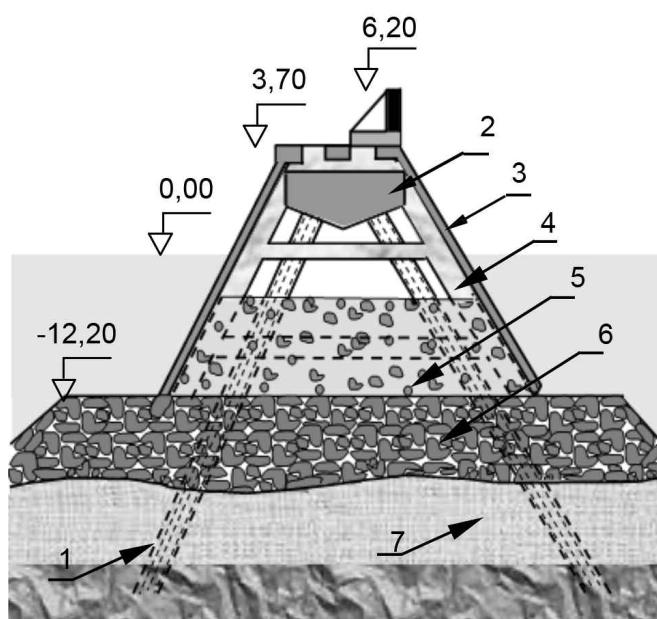


Figure 7 : Jetée mixte gravité-pieux.

La nouvelle conception combinée gravité-pieux d'un ouvrage de soutènement (figure 8a), permet d'utiliser des blocs creux classiques en béton et de transmettre les charges au sol de fondation par l'intermédiaire des pieux. Une unité standard gravité-pieux d'une telle structure comporte un pieu support enfoncé dans le sol, associé à un socle qui reprend les efforts transmis par les blocs. Les fonctions des éléments de la structure sont ainsi partagées : les efforts latéraux exercés sur la structure sont repris par les forces de frottement entre blocs (le long des surfaces de contact entre blocs, ou entre les blocs et le socle). Le poids des blocs de la superstructure et d'autres charges verticales sont transmis au sol de fondation par l'intermédiaire des pieux. Ceci permettra de réduire les contraintes sur le sol de fondation.

La construction d'une telle structure peut se faire en procédant à l'assemblage de plusieurs unités identiques. Après assemblage et remblayage, on introduira les pieux dans les tubes et on les enfoncera jusqu'au refus. Des blocs d'un poids d'environ

ron 1MN et des tubes en acier d'environ 1m de diamètre peuvent être utilisés pour des ouvrages d'accostage et d'amarrage ou pour des ouvrages de protection des ports, en disposant les unités standards en une, deux ou plusieurs rangées et en les reliant par une plateforme commune (figure 8b).

5. CONCLUSION

Dans cette étude, on a proposé de nouvelles conceptions pour l'amélioration et la modernisation des principaux ouvrages portuaires de protection et d'accostage. Certaines d'entre elles sont restées au stade expérimental, tandis que d'autres ont été mises en application dans la construction et/ou la reconstruction de digues de protection, ou de murs de quai dans certains ports maritimes de Russie et d'Ukraine. Ceci a eu comme conséquence une réduction des coûts des ouvrages de 10 à 12% par rapport aux conceptions traditionnelles.

La structure portuaire constituée de blocs trapézoïdaux, bien qu'elle soit de type gravitaire, ne nécessite pas forcément une assise de bonne qualité, car la répartition des forces se fait sur une grande largeur grâce à la forme des blocs qui implique les blocs des colonnes voisines.

Dans les ouvrages construits avec des blocs raccordés, les éléments cylindriques maintiennent les blocs et répartissent uniformément les charges entre eux en cas de tassement différentiel, ce qui a pour conséquence de réduire l'épaisseur des assises de fondation et d'accélérer le processus d'édification.

En construisant un quai avec des blocs sous forme de cale, on peut éviter d'utiliser des moyens de manutention lourds. Il suffirait de réaliser un dragage incliné devant le quai, et les blocs glisseront un à un sous l'effet de leur poids propre. Les murs en palplanches en demi-anneaux sont très avantageux par rapport aux murs de palplanches classiques,

puisque'ils offrent plus de rigidité et peuvent être réalisés avec des matériaux différents.

Dans les cas de structures mixtes gravité-pieux, la partie gravitaire de la structure procure la stabilité, tandis que les pieux transmettent les charges externes aux couches profondes de bonne portance.

Certaines de ces nouvelles structures devraient être examinées en conditions réelles de site, pour affiner l'étude de l'interaction de ces structures avec le sol de fondation et pour mettre en œuvre les détails technologiques de leur réalisation.

6. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient leurs collègues de *Odessa National Maritime University* et de *Black Sea Design and Research Institute of Marine Transport (Odessa, Ukraine)* pour leur coopération permanente, pour leur soutien et leurs conseils prodigieux.

7. RÉFÉRENCES

- [1] Handbook Quay Walls, Centre for Civil Engineering Research and Codes, Port of Rotterdam, Taylor & Francis Group, 2005.
- [2] M.P. Doubrovsky, M.B. Poizner, Foundations of onshore and offshore constructions on Ukrainian Black Sea and Azov Sea coasts, in: Proceedings of 11th Baltic Sea Geotechnical Conference "Geotechnics in Maritime Engineering", Gdansk, Poland, 2008, Vol. 2, pp. 935-940.
- [3] S. Gabi, A. Belakrouf, O. Koren, Study of piled quay structures regarding their physical wear, Bases and Foundations 31 (2008), pp. 10-19.
- [4] M.P. Doubrovsky, G.N. Meshcheryakov, Conceptual techniques for full-scale physical modeling of pressed-in pile behavior, in: Proceedings of the International Conference on Physical Modeling in Geotechnics: ICPMG, Taylor & Francis Group, London, 2010, pp. 817-822.

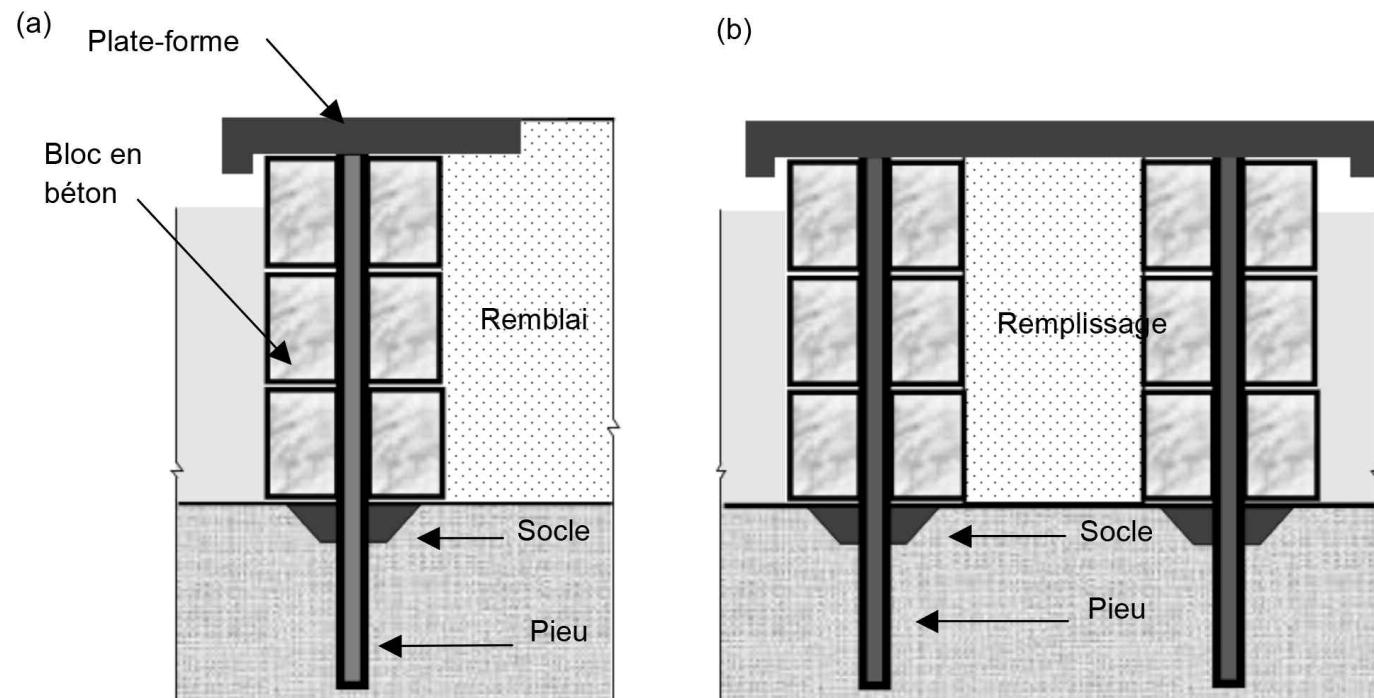


Figure 8 : Structure gravité-pieux : (a) mur de quai; (b) digue de protection.