



Extension du port de la Turballe - Conception d'une butée de pied sur sol rocheux sans avoir recours au déroctage

David LAJOIE¹

1. Ingénieur Conseil, SAS HydroGC, 06 32 36 56 92, 06530 Le Tignet, France.
 david.lajoie@hydrogc.fr

Résumé :

La nouvelle digue du port la Turballe repose en partie sur un sol rocheux dans lequel une souille aurait dû être déroctée pour buter le pied de la carapace. Les contraintes d'environnement et de travaux ont conduit à imaginer une solution alternative pour buter le pied de l'ouvrage sur sol dur, sans avoir recours au déroctage et sans risquer la déstabilisation du pied de digue par effet de roulage des blocs. Les solutions classiques consistant à ancrer une poutre ou des pieux espacés au sol ont été écartées au profit d'une solution par percolation partielle au béton des blocs d'encrochement de butée de pied sur le sol. La configuration de la butée de pied et la nature de l'écoulement hydraulique étant modifiées, une méthode de calcul est mise au point pour justifier du bienfondé de la solution. La taille des blocs peut être justifiée préalablement par les formulations classiques de la littérature. L'impact de l'opacité engendrée au niveau du béton cyclopéen est analysé à travers une modélisation par canal à houle numérique intégrant les milieux poreux. Le calcul des efforts hydrodynamiques à l'échelle de la butée sont cohérents avec les dimensionnements préalables. Ils confirment la bonne stabilité de la solution et l'absence d'impact significatif sur les autres parties de l'ouvrage.

Mots-clés : Digue, Butée de pied, Déroctage, Béton cyclopéen.

Abstract:

The new breakwater of the harbour of La Turballe lays on a rocky ground, where a classic trench might have to be digged in order to lock the armour toe. Environment and building constraints drove to imagine an alternative solution without rock breaking, avoiding risks of destabilization by block rolling. Classical solutions based on beam or pile anchoring have been abandoned for the benefit of a solution based on partial concrete percolating of the armour toe. The toe layout and the hydraulic flow being modified, a calculation method is implemented to design the solution. The toe rock block size is justified using classical formulae from literature. Simulations with numerical wave flume including porous media allow to analyze impact of opacity induced by concrete. It is shown that results from simulations and from formulae are compliant. The solution is stable with no impact over the other parts of the breakwater.

Keywords: Breakwater, Toe, Rock breaking, Percolated concrete.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

1. Introduction

L'extension du port de plaisance de la Turballe est un projet ambitieux, incluant la construction d'une nouvelle digue du large et d'une nouvelle contre-jetée, implantées en partie sur des sols rocheux. La conception de base, mise au point par le groupement de maîtrise d'œuvre BRL/SCE, s'appuyait classiquement sur une fondation du pied de digue dans une souille déroctée, figure 1.

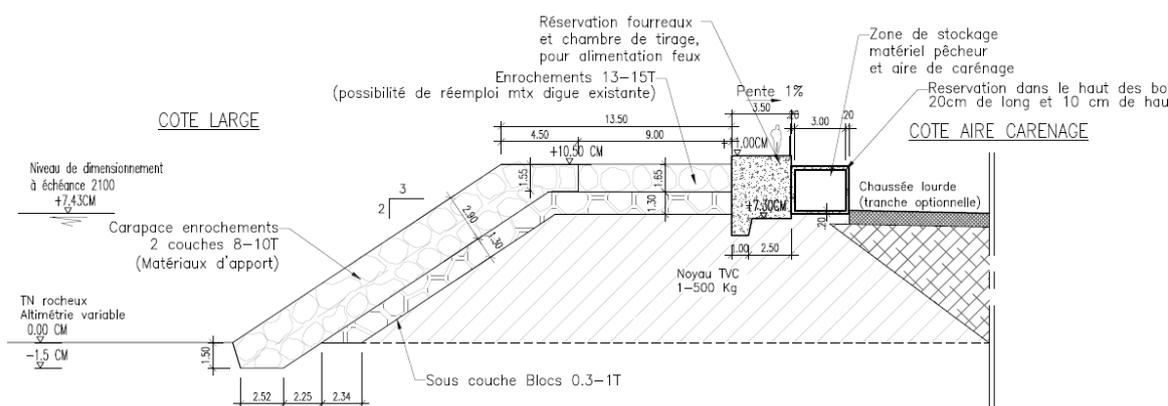


Figure 1. Coupe type projet de la nouvelle digue du port de la Turballe sur sol rocheux.

L'Entreprise CHARIER, chargée des travaux, avait prévu initialement d'employer des méthodes par micro-minage pour creuser la souille en pied de digue. Il s'avère que ces méthodes n'ont pas été admises par les autorités environnementales. La dureté de la roche à des profondeurs relativement élevées rendait très difficile le creusement d'une souille au brise-roche hydraulique. Des solutions alternatives au déroctage ont été demandées pour concevoir un pied de digue qui serait suffisamment robuste sur le sol rocheux, sans risquer le roulage des blocs de pied ou le défaut de maintien des Xblocs artificiels ou enrochements naturels constituant la carapace.

Les solutions alternatives classiques préconisées par l'état de l'art ont d'abord été examinées, comme le forage d'une ligne de pieux faiblement espacés pour caler les blocs du premier rang sur le fond, ou la construction d'une poutre de butée de pied, celle-ci pouvant prendre différentes formes : poutre béton filante ancrée au rocher, géotubes remplis de béton. Une partie du linéaire de pied de digue se situant sur des zones découvertes à marée basse, ces solutions ont été jugées peu intéressantes face aux contraintes d'entretien en zone de marnage et surtout peu esthétiques, en particulier pour un tel site touristique, figure 2.

L'emploi de simples enrochements naturels a été jugé préférable pour remplacer la souille déroctée. La solution a été recherchée à travers la pose d'enrochements cyclopéens, liés au sol par du béton. La fixation au sol évite le roulage des blocs de pied sur le sol dur, mais elle crée une opacité locale au niveau de la butée de pied, modifiant l'écoulement

hydrodynamique sur cette partie, avec le risque d'amplifier les sollicitations attendues par rapport à la conception de base (figure 3).

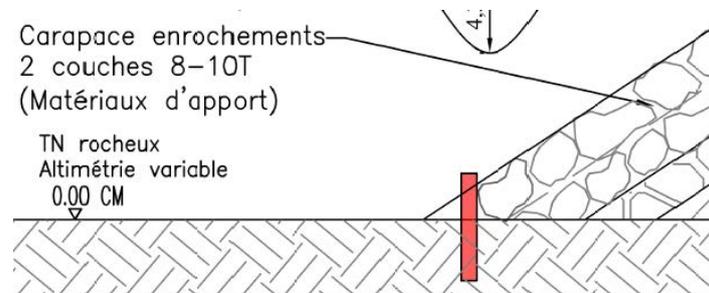


Figure 2. Alternative avec forage de pieux métallique au pied de la carapace.

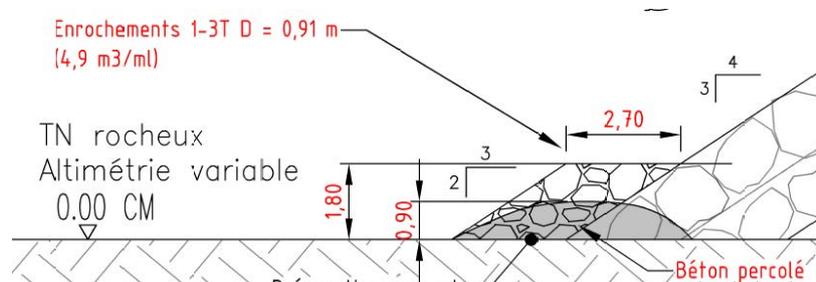


Figure 3. Alternative proposée avec percolation au béton de la base de la butée de pied.

Les travaux de conception de la solution originale proposée ont consisté à justifier la taille des blocs de butée de pied devant être placés au-dessus du sol, puis surtout à démontrer que le béton de percolation ne venait pas altérer le fonctionnement hydrodynamique ou le degré de stabilité de la solution de base de l'ouvrage.

2. Justification de la taille des blocs en pied

La solution de base de l'ouvrage a fait l'objet d'une campagne d'essais en canal à houle dans le laboratoire de l'ESITC Caen. Une partie du linéaire de digue reposant sur des zones sableuses, des sections incluant des butées de pied semi-ensouillées ont été testées en stabilité, démontrant la bonne tenue de butées de pied classiques avec des enrochements naturels de quelques tonnes. Les résultats d'essais ont été pris comme base de référence pour définir le paramètre théorique de stabilité N_{od} , associé à la formule classique de Van der Meer (voir guide des enrochements CETMEF, CUR, CIRIA, 2009) :

$$N_{od} = \left(1.6 \frac{\Delta D_{n50}}{H_S} + 0.24 \Delta \frac{h_t}{H_S} \right)^{-\frac{1}{0.15}} \quad (1)$$

H_S : hauteur significative de la houle en pied de l'ouvrage

Δ : densité apparente

D_{n50} : longueur nominale des enrochements

h_t : hauteur d'eau au-dessus de l'arase de la butée de pied

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

N_{od} : nombre de blocs déplacés sur la longueur du pied et sur une largeur égale à D_{n50}
Le paramètre théorique de stabilité associé aux conditions essais en canal était tel que $N_{od} = 0.25$, les observations faisant état d'un léger début de mouvement des blocs de la butée de pied dans les conditions extrêmes par niveau d'eau haut intermédiaire. Cette valeur est inférieure aux valeurs théoriques établies par Gerding, associant $N_{od} = 0.5$ et $N_{od} = 2$ respectivement à des notions de début de mouvement et dommages acceptables. Il s'agit toutefois d'une valeur référence à rapprocher de conditions d'essais en modèle réduit physique, sur laquelle il a été possible de se fonder pour adapter la nouvelle configuration de la butée de pied, celle-ci devant s'adapter avec des blocs positionnés plus haut, au-dessus du terrain naturel non dérocté.

Les nouvelles tailles de blocs de butée de pied des configurations adaptées ont été justifiées en suivant la démarche ci-après :

- Identifier les paramètres de hauteurs de houle au déferlement H_{m0} , H_s , $H_{2\%}$, H_{max} à partir des caractéristiques de projet à l'approche du port et des abaques classiques (BATTJES, 2000), en faisant varier le niveau d'eau depuis le niveau haut extrême jusqu'au niveau des plus basses mers, figure 4.

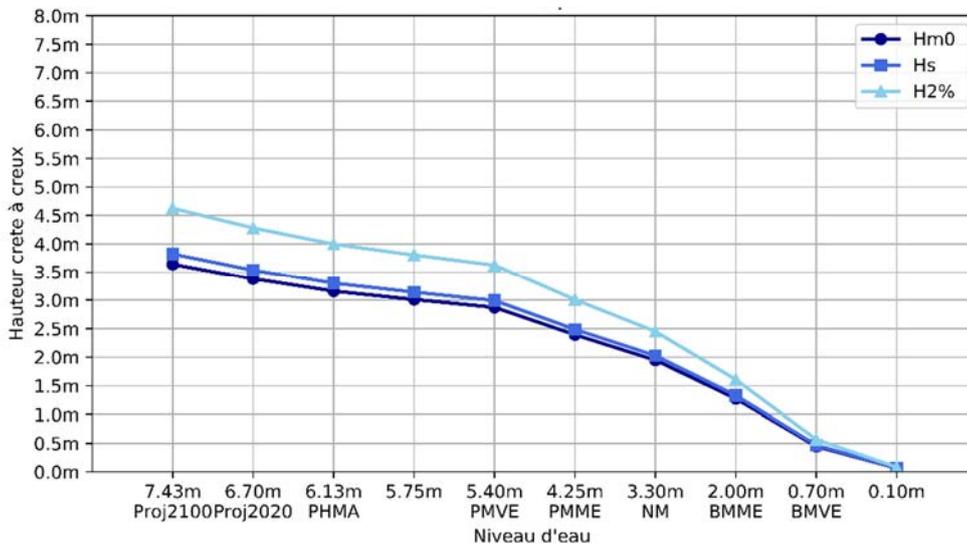


Figure 4. Evolution des hauteurs de houle de projet en fonction du niveau d'eau.

- Calculer le paramètre de stabilité N_{od} pour les niveaux d'eau où la formulation de Van der Meer est applicable. En dehors de la zone de validité, c'est-à-dire par niveau d'eau bas s'approchant de la crête de butée de pied, le pied de digue est considéré comme une digue émergente, dont la stabilité est évaluée via le paramètre S d'une autre formulation classique de Van der Meer, applicable aux carapaces de digues à talus, figure 5.

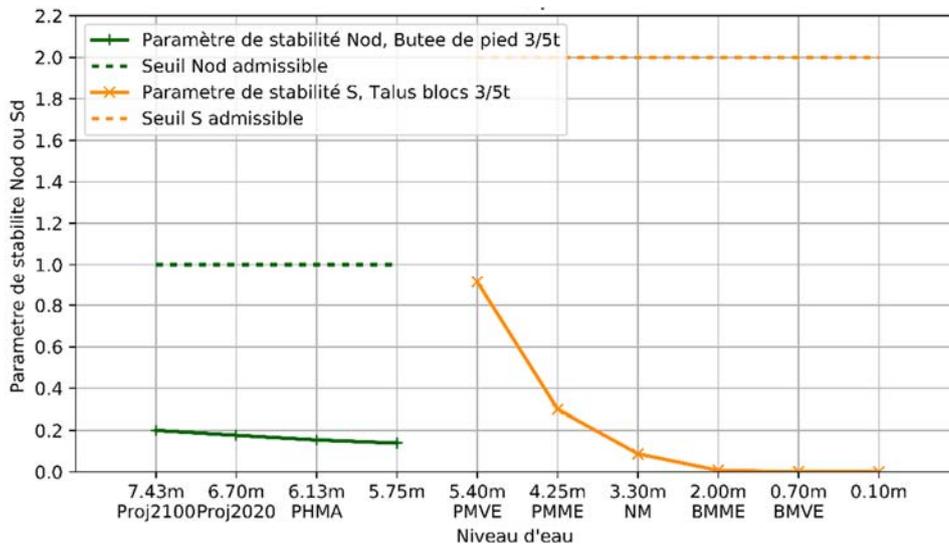


Figure 5. Paramètres de stabilité N_{od} (butée de pied, marée haute) et S (talus marée basse).

- c) S'assurer que les paramètres théoriques N_{od} et S étaient non seulement sous les seuils admissibles par conditions extrêmes, mais aussi que N_{od} restait dans la gamme de valeurs correspondant aux résultats satisfaisants des essais en canal à houle.

Cette démarche a conduit à devoir légèrement augmenter la taille des blocs de pied au regard des solutions de base testées en canal à houle (gamme 3/5t au lieu de 1/3t).

3. Effets induits par la percolation au sol

Une butée de pied posée sur sol rocheux irrégulier risque de se disloquer par effet de mauvaise accroche ou de roulage dès les premières sollicitations de tempête. Ce risque est écarté en percolant au béton la base de la première couche de blocs, de manière à la fixer sur le sol dur. La seconde couche peut être classiquement déposée sur la première couche, à condition que les blocs aient suffisamment de poids, ce qui est justifié ci-avant par les paramètres de stabilité. Il faut également que les blocs de la seconde couche soient enchevêtrés dans les creux de la première couche pour retrouver une configuration classique de butée de pied. En ce sens, la percolation au béton est préconisée uniquement à la base de la première couche, sur environ moitié de son épaisseur. Il en résulte toutefois une butée de pied dont la base est plus étanche qu'une butée de pied classique en enrochements.

Cette modification par rapport aux butées de pied classiques composées uniquement d'enrochements exige de vérifier ce qui suit :

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

- a) la stabilité globale de la butée en enrochement cyclopéen (ou bétonné), sachant que l'étanchéité sur la base de la butée a en principe tendance à augmenter les sollicitations hydrodynamiques ;
- b) la stabilité des blocs non percolés sur la couche supérieure de la butée, ceux-ci pouvant éventuellement être plus sollicités que sur une butée classique.

L'écoulement hydrodynamique à travers les différents milieux poreux ou opaques a été modélisé en canal à houle numérique (logiciel WavesToFoam). La modélisation des milieux poreux respecte les équations de Forchheimer, les paramètres étant ajustés suivant diverses approches théoriques et expérimentales (VAN GENT, 1995).

Le gradient hydraulique $i = \frac{1}{\rho g} \frac{\partial P}{\partial x}$, associé à l'écoulement oscillant dans le milieu poreux s'exprime, comme suit :

$$i = Au_f + Bu_f^2 + C \frac{\partial u_f}{\partial t} \quad (2)$$

Les expressions des coefficients A, B et C ont été identifiées par (VAN GENT, 1995) après analyse des équations primitives de Navier-Stockes :

$$A = \alpha \frac{v(1-n_f)^2}{gD_{n50f}^2 n_f^3} ; B = \beta \frac{(1-n_f)}{gD_{n50f} n_f^3} ; C = \frac{1+\gamma(1-n_f)/n}{gn_f} \quad (3)$$

α , β , et γ sont des fonctions dépendantes des nombres de Reynolds et de Keulegan-Carpenter de l'écoulement. Leurs ordres de grandeur sont respectivement $\alpha \approx 500$, $\beta \approx 2$, et $\gamma \approx 0.34$. Ces valeurs ont donné satisfaction dans le cadre de travaux de recherche comparant théorie et résultats expérimentaux. Elles ont été validées à travers plusieurs dispositifs d'enrochements verticalisés encagés, pour lesquels on a mesuré les efforts oscillants, les hauteurs de houle réfléchies et transmises en faisant varier la taille moyenne des blocs d'enrochements tout en maîtrisant la porosité comprise entre 35% et 40% (MILESI, 2019). Dans la mesure où les essais en canal à houle de l'ESITC Caen n'étaient pas orientés sur le comportement hydraulique dans le milieu poreux, ces valeurs ont été retenues comme base pour comparer les comportements des écoulements au niveau de la butée de pied avec et sans percolation au béton.

$$g = 9.81 \text{ m.s}^{-2}$$

D_{n50f} : diamètre passant à 50% des grains ou blocs du milieu poreux

n_f : porosité du milieu

u_f : vitesse de flux à travers le milieu poreux.

La méthode « Volume of Fluid » du canal à houle numérique a été mise en œuvre pour reproduire une succession de vagues régulières de hauteur H_{\max} venant déferler sur pente douce au niveau de la butée de pied, selon le mode glissant. Les conditions de projet sont

telles que $H_{m0}=4.3\text{m}$, $H_{\max}=8.6\text{m}$, $T_P=16.6\text{s}$ au large immédiat de la zone de déferlement. Les hauteurs se réduisent progressivement au fur que l'on pénètre la zone de déferlement (pied à 0m CM, hauteur d'eau comprise entre 0m et 7.5m selon le niveau de marée). On retient volontairement $T=T_P$ comme période de houle régulière caractéristique de l'état de mer irrégulier. Ce choix est guidé par les raisons suivantes :

- a) La houle régulière telle que $T=T_P$ majore légèrement la houle irrégulière en termes de vitesse orbitale horizontale au sol (voir figure 6 ci-dessous).

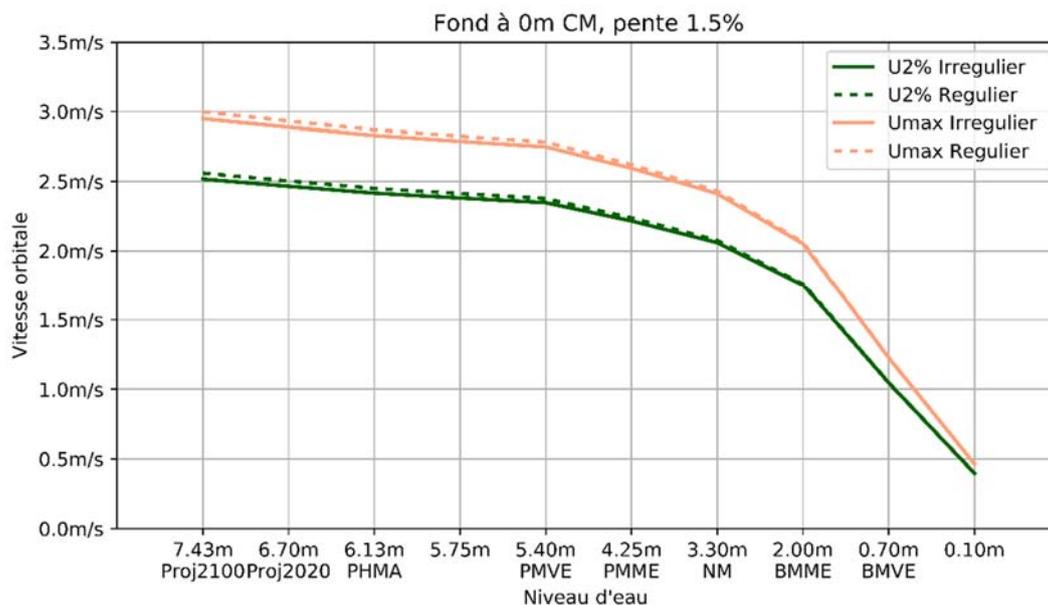


Figure 6. Comparaison de la vitesse orbitale au fond, houle irrégulière (analyse spectrale Jonswap $\gamma=3.3$) et houle régulière telle que $H=H_{\max}$ $H=H_{2\%}$ avec $T=T_P$.

- b) Les besoins en ressource informatique pour ce type de code sont très élevés. Il importe d'atteindre les objectifs de comparaison de configurations tout en maîtrisant le volume de calcul. Dans le cas présent, on applique un maillage relativement fin (maille de 0.2m) pour des pas de temps de quelques millièmes de secondes, préférant modéliser finement quelques vagues successives sur plusieurs heures CPU, plutôt que simuler un grand nombre de vagues au détriment de la finesse du modèle.

Les mêmes successions de vagues ont été simulées avec et sans percolation de la butée de pied, figures 7 à 9. On montre que le bétonnage partiel des enrochements accroît significativement les sollicitations en pied. Cependant, l'augmentation des pressions hydrodynamiques ne s'étend pas au-delà des parties opaques fixées au sol, l'intensité des vitesses d'écoulement et les pressions dynamiques restant très peu impactées sur les

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

parties non percolées de l'ouvrage (voir les valeurs des efforts globaux sur la butée de pied selon plusieurs niveaux d'eau, tableaux 1 à 3).

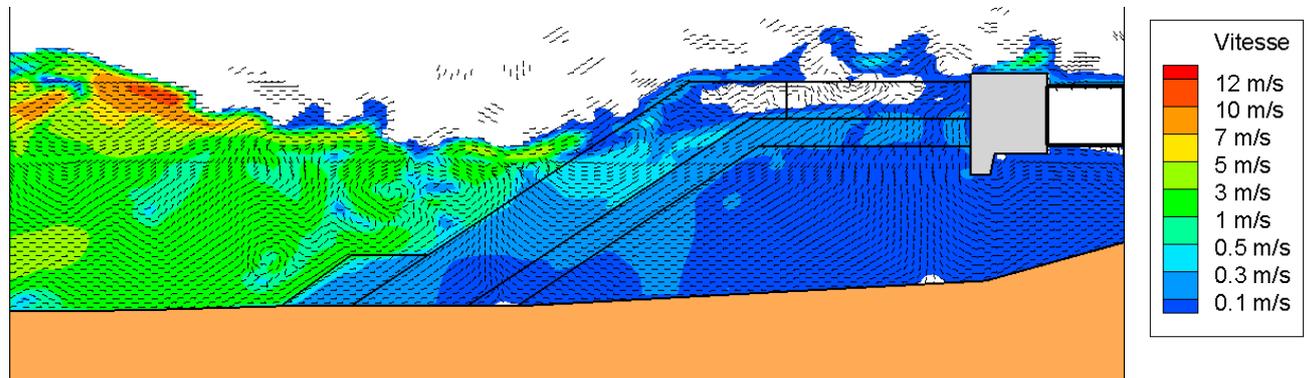


Figure 7. Champ de vitesse à l'approche de la vague sur le talus (butée de pied classique).

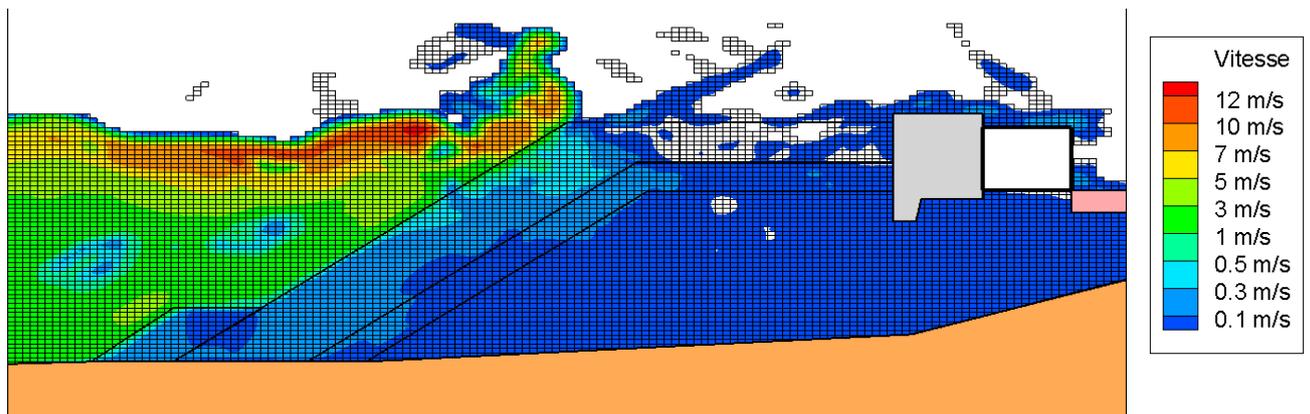


Figure 8. Champ de vitesse à l'effondrement de la vague sur le talus (butée de pied classique).

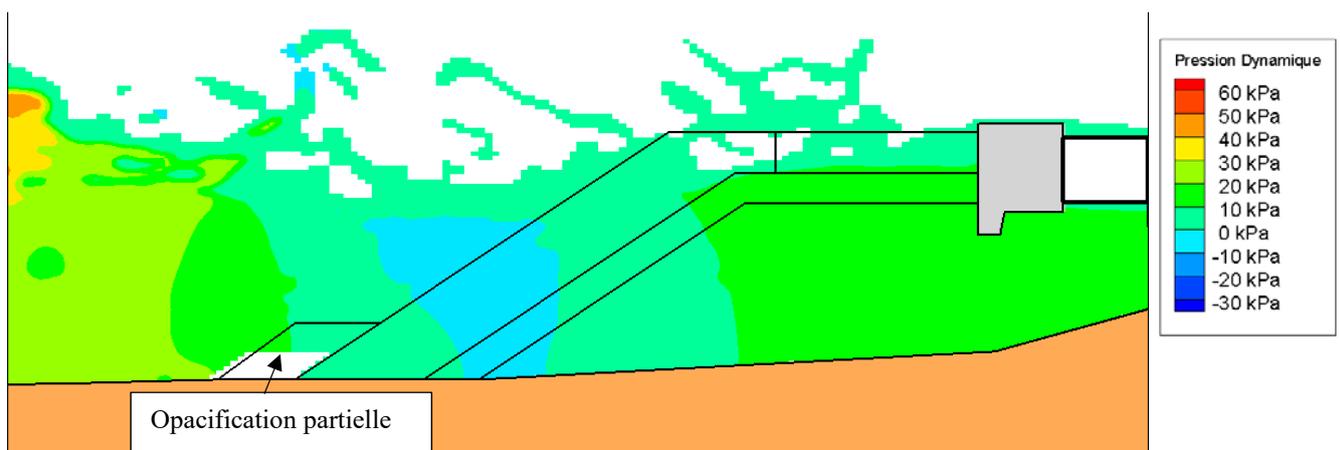


Figure 9. Champ de pression dynamique (butée de pied partiellement opacifiée).

*Tableau 1. Efforts obtenus par intégration des pressions autour de la butée de pied.
Niveau d'eau 7.43m CM.*

<i>Partie de butée</i>	<i>Effort horizontal</i>		<i>Effort vertical</i>	
	<i>Butée classique</i>	<i>Butée percolée</i>	<i>Butée classique</i>	<i>Butée percolée</i>
<i>Partie haute</i>	9 kN/ml	9 kN/ml	5 kN/ml	4 kN/ml
<i>Partie basse</i>	12 kN/ml	19 kN/ml	2 kN/ml	23 kN/ml
<i>Butée entière</i>	22 kN/ml	26 kN/ml	7 kN/ml	23 kN/ml

*Tableau 2. Efforts obtenus par intégration des pressions autour de la butée de pied.
Niveau d'eau 5.5m CM.*

<i>Partie de butée</i>	<i>Effort horizontal</i>		<i>Effort vertical</i>	
	<i>Butée classique</i>	<i>Butée percolée</i>	<i>Butée classique</i>	<i>Butée percolée</i>
<i>Partie haute</i>	10 kN/ml	9 kN/ml	5 kN/ml	4 kN/ml
<i>Partie basse</i>	15 kN/ml	17 kN/ml	2 kN/ml	28 kN/ml
<i>Butée entière</i>	23 kN/ml	26 kN/ml	5 kN/ml	28 kN/ml

*Tableau 3. Efforts obtenus par intégration des pressions autour de la butée de pied.
Niveau d'eau 3.3m CM.*

<i>Partie de butée</i>	<i>Effort horizontal</i>		<i>Effort vertical</i>	
	<i>Butée classique</i>	<i>Butée percolée</i>	<i>Butée classique</i>	<i>Butée percolée</i>
<i>Partie haute</i>	7 kN/ml	10 kN/ml	5 kN/ml	3 kN/ml
<i>Partie basse</i>	10 kN/ml	21 kN/ml	2 kN/ml	20 kN/ml
<i>Butée entière</i>	15 kN/ml	30 kN/ml	6 kN/ml	20 kN/ml

Il s'avère que le flux pénétrant une butée de pied classique en enrochement est de l'ordre de quelques dizaines de cm/s, alors que l'écoulement orbitale qui la contourne est de plusieurs m/s. Opacifier une partie de la butée de pied ne modifie pas fondamentalement l'écoulement extérieur à la butée, ni même celui pénétrant les parties poreuses adjacentes. Il en résulte des sollicitations très similaires sur les enrochements libres de la butée, avec ou sans présence de percolation au béton, l'ordre de grandeur n'étant pas fondamentalement pas modifié avec la baisse du niveau d'eau.

La partie opaque n'est en revanche plus « traversée » par l'écoulement, mais contournée. La répartition des pressions hydrodynamiques autour de la partie opaque crée un effort supplémentaire de l'ordre de quelques kN/ml dans le sens horizontal et jusqu'à 20kN/ml dans le sens vertical. Cette augmentation est à relativiser :

- a) Elle s'applique sur un ensemble de blocs dont le poids apparent est d'environ 120kN/ml, ce qui est loin de mettre en péril la stabilité de la butée de pied si on ne considère que son propre poids comme force stabilisatrice. Le calcul par

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

interaction houle-structure poreuse amène une justification supplémentaire des formules de la littérature concernant les butées de pied.

- b) La résistance apportée par la présence du béton collé au sol est de l'ordre de plusieurs centaines de kN/ml dans le sens du cisaillement, ce qui procure un facteur de sécurité considérable face au risque de glissement, procurant à la butée en enrochement cyclopéen une réserve de stabilité bien plus grande que celle d'une butée classique sur sol meuble ou permettant une accroche. En réalité, le béton percolé au sol a pour rôle essentiel d'empêcher les blocs de rouler, il est peu sollicité et n'a pas besoin de présenter des caractéristiques exceptionnelles au regard des efforts supplémentaires engendrés.

4. Conclusion

Le risque de déstabilisation des pieds de digue sur sol dur reste un sujet ouvert qui peut être réglé via plusieurs solutions de génie civil maritime, impliquant généralement des ancrages au sol. La simulation des interactions houles-structures en milieu poreux a permis de justifier une solution de type percolation partielle au béton, offrant quelques avantages, notamment au regard des contraintes esthétiques.

Remerciements

L'auteur remercie Antoine Thaury, Valentin Bucquet et Christophe Bouniol de l'Entreprise Charrier, ainsi que Nicolas Fraysse de BRLi, maître d'œuvre de l'extension du port de la Turballe.

5. Références bibliographiques

- BATTJES J.A, GROENENDIJK H.W (2000). *Wave distributions on shallow foreshores*, Coastal Engineering, Volume 40, Issue 3, pp. 161-182, [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(00\)00007-7](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(00)00007-7)
- CETMEF, CUR, CIRIA (2009). *Guide Enrochement, l'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques*, version française du Rock Manual (2ème édition), Editeur CIRIA, 1302p., ISBN 978-2-11-098518-7
- MILESI P. (2019). *Interactions between waves and new generations of breakwaters with small footprint*, Thèse de doctorat, IIPHE et Ecole Centrale de Marseille. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02383932>
- VAN GENT M.R.A. (1995). *Wave interaction with permeable coastal structures*. PhD Thesis, Delft University of Technology. ISBN 90-407-1182-8