



Conception d'une digue à berme reprofilable pour le projet d'extension du port de Roscoff-Bloscon

Yves STASSEN¹, Isabelle LESPRIT²

1. CHARIER SA, 15 boulevard Marcel Paul, 44800 Saint Herblain, France.
ystassen@charier.fr
2. OCEANIDE, Port de Brégaillon, BP 63, 83502 La Seyne sur Mer cedex, France.
ilesprit@oceanide.net

Résumé :

Le projet d'extension du port de Roscoff-Bloscon comprend la création d'une digue à talus de 550 m de long. Ces travaux ont fait l'objet d'un appel d'offres public, sur la base d'une carapace de digue en blocs artificiels de type ACCROPODETM de 6.3 m³. L'entreprise Charier a proposé une variante fondée sur le principe d'une "digue à berme reprofilable". Ce type d'ouvrage est constitué d'une carapace en enrochements naturels présentant une berme susceptible d'être remaniée lors de fortes tempêtes pour acquérir un profil en S stabilisé sous l'action de la houle. Le profil de digue proposé a fait l'objet d'un pré-dimensionnement analytique puis d'une campagne d'essais menée par Océanide. Ces études ont permis de valider les performances de l'ouvrage en termes de stabilité et de franchissement. Elles ont permis au maître d'ouvrage (CCI de Morlaix) de se prononcer en faveur de cette solution performante d'un point de vue technique, économique et environnemental.

Mots-clés :

Digue – Houle – Essais en canal – Enrochements – Berme

Abstract:

The extension project of Roscoff-Bloscon harbour includes a 550 m long rubble mound breakwater. Invitation to tender for the construction works was based on a 6.3 m³ ACCROPODETM armoured breakwater. An alternative design has been proposed by Charier, based on a berm breakwater concept. This kind of breakwater consists of a rock armour allowed to reshape to a stabilized S profile under storm wave action. The design studies included preliminary calculations of the breakwater profile and physical testing at Océanide wave flume. These studies confirmed the stability and overtopping performances of the proposed breakwater. They allowed the Owner to adopt this solution under technical, economical and environmental performance perspective.

Keywords:

Berm breakwater – Wave – Wave flume – Rock armour

1. Introduction

L'extension du port de Roscoff-Bloscon, situé sur la côte nord du Finistère, comprend la création d'un bassin de 625 places dédié à la plaisance, en complément des activités actuelles : ferries, cargos et pêche. Cette extension nécessite la création d'une digue de protection d'une longueur de 550 m garantissant la protection du plan d'eau vis-à-vis des houles du large.



Figure 1. Situation générale du projet.

Les travaux de construction ont fait l'objet d'un appel d'offres public lancé en mars 2009 par la Chambre de Commerce et d'Industrie de Morlaix, sur la base d'une digue à talus constituée d'une carapace en blocs artificiels de type ACCROPODETM de 6.3 m³. Dans le cadre de cet appel d'offres, l'entreprise Charier a étudié et proposé une variante au projet initial, basée sur le principe d'une "digue à berme reprofilable". Ce type d'ouvrage est constitué d'une carapace en enrochements naturels présentant une berme susceptible d'être remaniée lors de fortes tempêtes pour acquérir un profil en S stabilisé sous l'action de la houle.

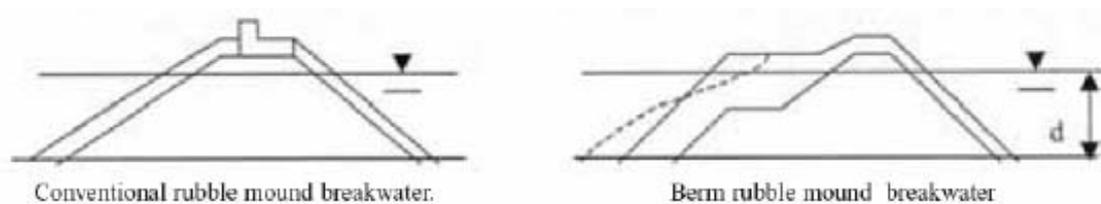


Figure 2. Principe de digue à berme reprofilable.

Conformément aux recommandations de l'AIPCN (2003), ces digues sont classées en 3 catégories :

- Ouvrages stables, non reprofilables :
Seul le déplacement de quelques blocs est admis (digue à talus classique).
- Ouvrages statiquement stables reprofilables :

Le profil de répartition de l'enrochement peut être modifié par la houle pour former un profil en S naturellement stable dans lequel chaque bloc individuel est stable.

- Ouvrages dynamiquement stables reprofilables :

Le profil de répartition de l'enrochement est modifié par la houle pour former un profil en S naturellement stable dans lequel les blocs individuels continuent de se déplacer sur le talus.

L'intérêt fondamental des digues à berme est d'autoriser une réduction significative de la taille des blocs de carapace et, dans une certaine mesure, de permettre une conception de l'ouvrage adaptée aux matériaux disponibles à proximité du site de construction.

2. Ouvrages du même type

Ce type de digue s'est largement répandu depuis les années 80 avec plus de 60 réalisations répertoriées dans le monde, accompagnées de la publication de nombreux travaux théoriques, expérimentaux et retours d'expériences. Les références existantes montrent que les digues à berme sont adaptées à des conditions de site difficiles, comparables à celles du port de Roscoff en termes de profondeur d'eau et de caractéristiques de houle.

Tableau 1. Principaux ouvrages réalisés depuis 2001.

Breakwater	Constr.year	H _s
Sirevåg berm breakwater, Norway	2000-2001	7.0 m
Húsavík berm breakwater, Iceland	2001-2002	6.8 m
Grindavík berm breakwater, Iceland ¹⁾	2001-2002	5.1 m
Hammerfest berm brkw, Norway	2002-2003	7.5 m
Vopnafjörður breakwater, Iceland ²⁾	2003-2004	4.0 m
Þorlákshöfn berm brkw, Iceland	2004-2005	5.7 m



Figure 3. La digue à berme de Sirevag en Norvège.

3. Pré-dimensionnement de l'ouvrage

3.1 Conditions de site

L'ouvrage est destiné à protéger le nouveau bassin portuaire des houles du large, de secteur Nord à sud Ouest. Une digue flottante prolonge l'ouvrage afin de protéger le bassin des houles de secteur Sud levées en baie de Paimpol. Les houles de projet retenues par le maître d'œuvre pour le dimensionnement de la digue sont reportées dans le tableau 2.

Tableau 2. Houles de projet.

Période de retour	Niveau d'eau	H_s	T_p
10 ans	+5.5 CM	4.3 m	10 s
100 ans	+5.5 CM	5.2 m	12 s
10 ans	+9.0 CM	4.3 m	10 s
100 ans	+9.0 CM	5.2 m	12 s
1 an	+10.0 CM	3.0 m	8 s
10 ans	+10.0 CM	4.3 m	10 s

Le site est soumis à un marnage important, pouvant atteindre 9.50 m aux plus forts coefficients de marée (hors surcote) : plus basse mer astronomique à 0.20 m CM et plus haute mer astronomique à 9.75 m CM. La cote d'arase de l'ouvrage a été définie par le maître d'œuvre à +13.50 m CM sur la base de critères de limitation des franchissements.

3.2 Principaux paramètres

On désigne par $\Delta = (\rho_s - \rho_w) / \rho_w$ la densité relative déjaugée des enrochements, D_{n50} le diamètre nominal médian des enrochements et T_m la période moyenne de la houle ($T_m = 0.77 \times T_p$). Les paramètres importants pour la stabilité et le reprofilage des digues à berme sont le nombre de stabilité statique $H_0 = H_s / (\Delta \cdot D_{n50})$ et le nombre de stabilité dynamique $H_0 \cdot T_0$, avec $T_0 = T_m \cdot \sqrt{g / D_{n50}}$. Ces paramètres permettent de classer les digues selon les trois catégories mentionnées en introduction (voir tableau 3).

Tableau 3. Classification des digues à berme (suivant CIRIA et al. (2009)).

Régime	$N_s = H_0$	$H_0 T_0$
Mouvement faible, pas de reprofilage	<1,5 - 2,0	<20 - 40
Mouvement limité pendant le reprofilage ; statiquement stable	1,5 - 2,7	40 - 70
Mouvement notable, reprofilage ; dynamiquement stable	>2,7	>70

Les outils de pré-dimensionnement proposés dans la littérature (AIPCN, 2003 ; CIRIA *et al.*, 2009) consistent à évaluer l'évolution du profil de l'ouvrage (longueur et profondeur de récession de la berme) en fonction de ces paramètres et des caractéristiques des enrochements constituant la carapace. Ils permettent le pré-dimensionnement de la largeur et de l'épaisseur de berme nécessaire à l'intégrité de l'ouvrage, préalablement à la réalisation d'essais sur modèle réduit qui restent incontournables pour la validation du profil de digue.

3.3 Modèle de Hall et Kao

HALL et KAO (1991) ont proposé des règles de dimensionnement pour les digues à berme, établies à partir des résultats d'une vaste série d'essais sur modèles effectués à la Queen's University (Canada). Ils proposent une formule de calcul de récession de la berme, notée Rec , en fonction des paramètres suivants : H_0 (nombre de stabilité statique), D_{n50} (diamètre nominal médian des enrochements), D_{n85}/D_{n15} (gradation des enrochements), R_p (proportion de blocs arrondis).

La formule de calcul de récession de berme proposée par Hall et Kao s'écrit :

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = -12.4 + 0.39 \cdot H_0^{2.5} + 8.95 \cdot \left(\frac{D_{n85}}{D_{n15}} \right) - 1.27 \cdot \left(\frac{D_{n85}}{D_{n15}} \right)^2 - 7.3 \cdot R_p$$

Cette formule est réputée valable pour $2 < H_0 < 5$ et pour une durée correspondant à 3000 vagues. Hall et Kao ont mis en évidence une bonne concordance entre les estimations données par cette formule et les observations effectuées sur des digues réelles.

3.4 Modèle de Tørum

Les études plus récentes de TØRUM *et al.* (2003) sont également basées sur une grande série d'essais sur modèles réduits et conduisent à une formule de calcul de récession de berme en fonction des paramètres suivants : $H_0.T_0$ (nombre de stabilité dynamique), D_{n50} (diamètre nominal médian des enrochements), D_{n85}/D_{n15} (gradation des enrochements), h (profondeur d'eau). Ces études ont permis d'observer que, pour une digue à berme donnée, tous les profils modifiés recoupent la berme d'origine en un point quasi-fixe A situé à une profondeur h_f sous le niveau d'eau au repos. La profondeur h_f peut être estimée par la formule suivante :

$$\frac{h_f}{D_{n50}} = 0.2 \cdot \frac{h}{D_{n50}} + 0.5$$

Thème 5 – Ouvrages portuaires, côtiers et offshore

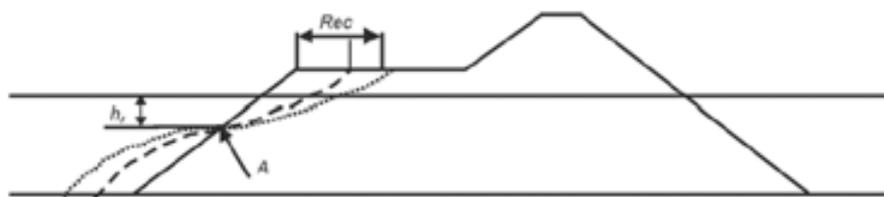


Figure 4. Paramètres calculés par le modèle de Tørum.

La formule de calcul de récession de berme donnée par Tørum s'écrit :

$$\frac{Rec}{D_{n50}} = 0.0000027 \cdot (H_0 \cdot T_0)^3 + 0.000009 \cdot (H_0 \cdot T_0)^2 + 0.11 \cdot (H_0 \cdot T_0) - f_1 \left(\frac{D_{n85}}{D_{n15}} \right) - f_2 \left(\frac{h}{D_{n50}} \right)$$

$$\text{avec } f_1 \left(\frac{D_{n85}}{D_{n15}} \right) = -9.9 \cdot \left(\frac{D_{n85}}{D_{n15}} \right)^2 + 23.9 \cdot \left(\frac{D_{n85}}{D_{n15}} \right) - 10.5$$

$$\text{et } f_2 \left(\frac{h}{D_{n50}} \right) = -0.16 \cdot \left(\frac{h}{D_{n50}} \right) + 4.0.$$

Cette formule est réputée valable pour $12.5 < h/D_{n50} < 25$ et $1.3 < D_{n85}/D_{n15} < 1.8$.

3.5 Profil de digue retenu

Le tableau 4 et la figure 5 présentent les caractéristiques du profil retenu suite aux calculs de pré-dimensionnement.

Tableau 4. Caractéristiques du profil retenu.

Carapace en enrochements naturels	3/6 Ton
Cote d'arase	+13.50 m CM
Largeur en crête	8.00 m
Pente des talus	4/3
Largeur de la berme	6.00 m
Cote de la berme	+11.00 m CM
Épaisseur de la carapace sous la berme	5.00 m
Épaisseur de la carapace sur le talus côté mer	4.00 m

3.6 Résultats de pré-dimensionnement

Les calculs de récession de berme sont effectués pour les conditions de houle décennale ($H_s=4.30$ m, $T_p=10$ s) et centennale ($H_s=5.20$ m, $T_p=12$ s) à marée haute (profondeur d'eau enveloppe de 15 m). Le tableau 5 présente les résultats de calcul de récession de berme suivant les formulations de Hall et Kao puis Tørum.

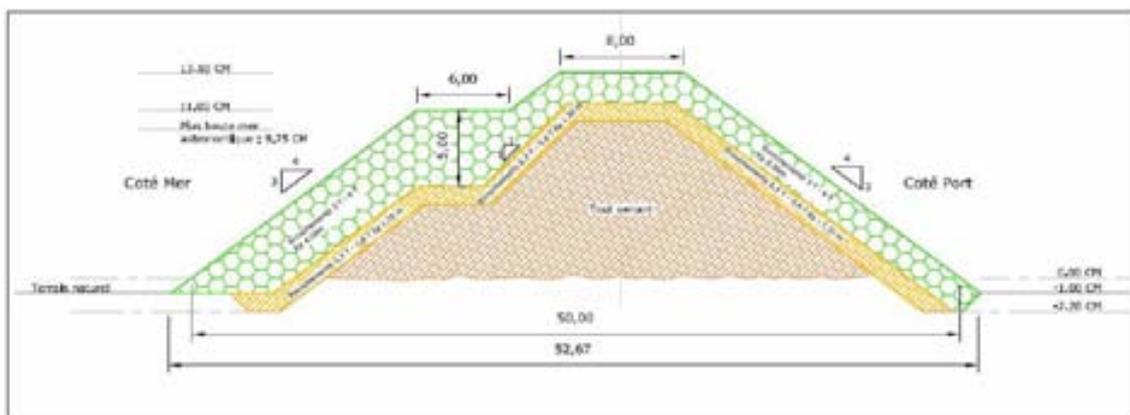


Figure 5. Profil de digue retenu.

Tableau 5. Résultats de calcul de récession de berme.

	Houle décennale		Houle centennale	
Caractéristiques houle	g	9.81 m/s ²	g	9.81 m/s ²
	h	15 m	h	15 m
	H _s	4.3 m	H _s	5.2 m
	T _p	10 s	T _p	12 s
	ρ _w	1.025 T/m ³	ρ _w	1.025 T/m ³
Caractéristiques enrochements	ρ _r	2.75 T/m ³	ρ _r	2.75 T/m ³
	M ₁₅	3 T	M ₁₅	3 T
	M ₈₅	6 T	M ₈₅	6 T
	M ₅₀	4.5 T	M ₅₀	4.5 T
	R _p	0%	R _p	0%
Paramètres de calcul	T _m	7.71 s	T _m	9.26 s
	Δ	1.68	Δ	1.68
	Dn ₅₀	1.18 m	Dn ₅₀	1.18 m
	Dn ₁₅	1.03 m	Dn ₁₅	1.03 m
	Dn ₈₅	1.30 m	Dn ₈₅	1.30 m
	Dn ₈₅ /Dn ₁₅	1.26	Dn ₈₅ /Dn ₁₅	1.26
Paramètres adimensionnels	H ₀	2.17	H ₀	2.62
	T ₀	22.25	T ₀	26.71
	H ₀ T ₀	48.25	H ₀ T ₀	70.02
Recession berme - Méthode "Hall & Kao"	Rec	0.00 m	Rec	1.42 m
Recession berme - Méthode "Torum"	Rec	0.00 m	Rec	3.32 m
	hf	- m	hf	3.59 m

Ces calculs conduisent aux prévisions de reprofilage décrites au tableau 6. Ils permettent de préciser les caractéristiques géométriques de la berme préalablement à la réalisation des essais de validation en canal à houle : largeur de berme de 6 m et épaisseur de la carapace de 5m sous la berme.

Tableau 6. Reprofilage attendu sous conditions de houle décennale et centennale.

Houle décennale	Pas de reprofilage de la digue.
Houle centennale	Reprofilage avec une estimation de récession de berme de l'ordre de 1.5 m à 3.5 m selon la méthode de calcul.
	Profondeur du point fixe estimée à 3.60 m environ.

4. Essais en canal à houle

Une campagne d'essais a été menée en canal à houle par Océanide. Les 6 conditions de houle de projet mentionnées au tableau 2 ont été simulées successivement et les dommages sont cumulés d'un essai à l'autre. Les principales conclusions sont reportées dans le tableau 7.

Tableau 7. Synthèse des résultats d'essais en canal.

Période de retour	Niveau d'eau	H_s	T_p	Stabilité
10 ans	+5.5 CM	4.3 m	10 s	Très peu de remaniement de blocs
100 ans	+5.5 CM	5.2 m	12 s	Très peu de remaniement de blocs
10 ans	+9.0 CM	4.3 m	10 s	Quelques remaniements de blocs
100 ans	+9.0 CM	5.2 m	12 s	Reprofilage sans impact sur la sous-couche
1 an	+10.0 CM	3.0 m	8 s	Aucun mouvement de bloc supplémentaire
10 ans	+10.0 CM	4.3 m	10 s	Reprofilage sans impact sur la sous-couche

La figure 6 présente le profil mesuré à l'issue des essais. On observe :

- une récession de la berme de l'ordre de 2.50 m à 3.00 m, conforme aux estimations des formules de pré-dimensionnement,
- une cote du point fixe à environ 7.00 m CM soit environ 3 m sous le niveau d'eau des derniers essais, résultat cohérent avec la valeur de 3.60 m fournie par la formule de pré-dimensionnement de Tørum,
- une protection efficace de la sous-couche et du corps de digue par la carapace, malgré quelques remaniements en houle centennale, conformes aux prévisions des formules de pré-dimensionnement.

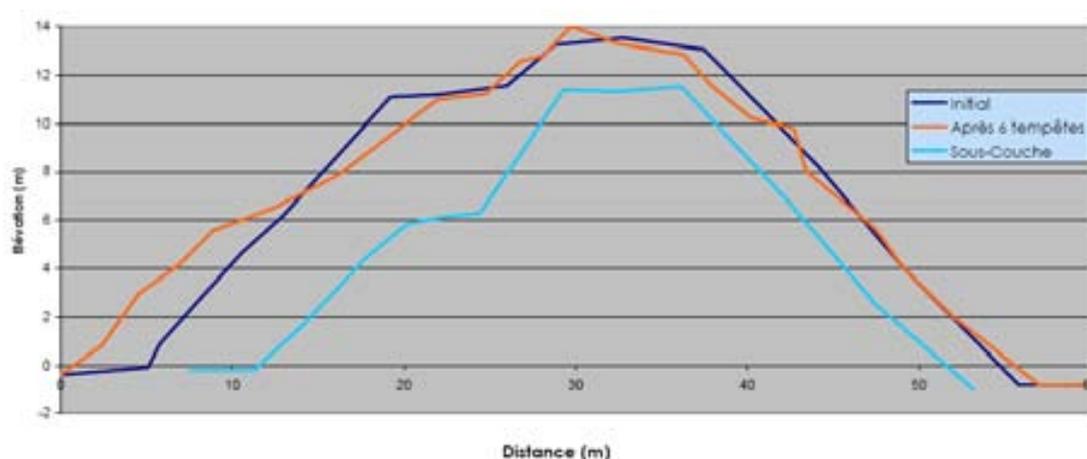


Figure 6. Profil de digue après essais (cumul des dommages des 6 tempêtes modélisées).

5. Conclusion

Dans le cadre du projet d'extension du port de Roscoff-Bloscon, le principe de digue à berme a permis à l'entreprise de proposer une conception adaptée aux matériaux disponibles à proximité du site. Le dimensionnement a fait l'objet d'une validation technique sur la base de méthodes de dimensionnement analytiques et d'essais en canal. Sous houle décennale, la carapace est statiquement stable, sans reprofilage du talus ni remaniement de blocs. Sous houle centennale, la carapace est dynamiquement stable, avec un reprofilage en S conforme aux prédictions analytiques. Le gain économique par rapport à la solution de base avec carapace en blocs artificiels est de l'ordre de 30% du coût global de construction de la digue. Du point de vue environnemental, cette solution présente un bilan carbone favorable, compte-tenu de la suppression du béton dont la fabrication est particulièrement émettrice de CO₂.

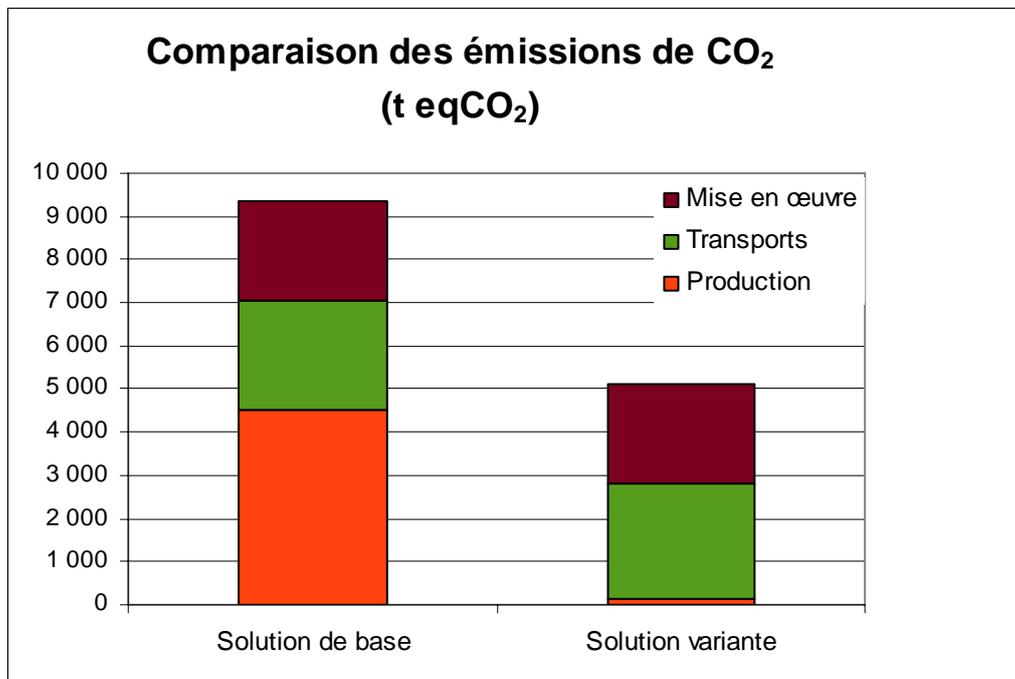


Figure 7. Bilan carbone, comparatif base/variante.

6. Références

AIPCN (2003). *State-of-the-art of designing and constructing berm breakwaters*. Rapport du Marcom GT 40, AIPCN, Bruxelles.

CIRIA, CUR, CETMEF (2009). *Guide Enrochement. L'utilisation des enrochements pour les ouvrages hydrauliques. Version française du Rock Manual, P09-01*, CETMEF, Compiègne 1302 p. Disponible en ligne sur URL :

<http://www.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/uploads/RockManual/intro.pdf>

Thème 5 – Ouvrages portuaires, côtiers et offshore

HALL K.R., KAO J.S. (1991). *A study of the stability of dynamically stable breakwaters*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 18(6), pp 916-925.

doi:10.1139/191-113

TØRUM A., KUHNEN F., MENZE A. (2003). *On berm breakwaters. Stability, scour, overtopping*, Coastal Engineering, vol. 49, n° 3, pp 209-238.

doi:10.1016/S0378-3839(03)00062-0