

Rock Manual

Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes

Céline TRMAL
CETMEF – DPMVN
Division Ouvrages Portuaires Maritimes
03 44 92 60 83 – celine.trmal@equipement.gouv.fr



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Études
Techniques Maritimes
et Fluviales

Plan de l'exposé

- Les différents types d'ouvrages maritimes en enrochements naturels
- Les principes de dimensionnement des digues
- Les fonctions des enrochements naturels
- Les caractéristiques des enrochements
- La carapace, les couches filtre et le noyau



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Études
Techniques Maritimes
et Fluviales

Ouvrages de protection des ports utilisant des enrochements

3

Digue à talus conventionnelle avec ou sans mur de couronnement



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

Ouvrages de protection des ports utilisant des enrochements

4

Digue à berme



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

Ouvrages de protection des ports utilisant des enrochements

5

Soubassement des digues verticales en caisson



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Études
Techniques Maritimes
et Fluviales

Ouvrages de protections des ports utilisant des enrochements

6

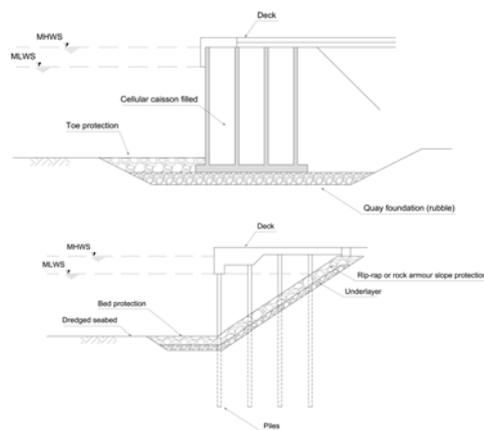
Digue surbaissée



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Études
Techniques Maritimes
et Fluviales

Ouvrages de protections des quais utilisant des enrochements 7



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Études
Techniques Maritimes
et Fluviales

Ouvrages de protection du littoral utilisant des enrochements 8

Revêtement



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Études
Techniques Maritimes
et Fluviales

Ouvrages de protection du littoral utilisant des enrochements ⁹

Brise-lame



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

Ouvrages de protection du littoral utilisant des enrochements ¹⁰

Epi



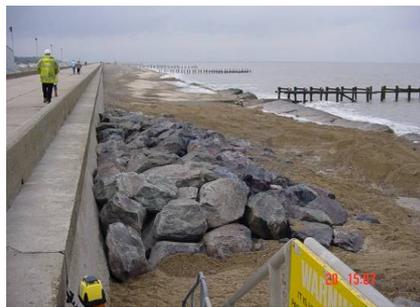
Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

Ouvrages de protection du littoral utilisant des enrochements

11

Protection de pied



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes

Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

Le dimensionnement des digues

12

La conception des digues doit prendre en compte de plusieurs aspects :

- ♦ Les performances hydrauliques
protection du plan d'eau (définition du plan masse), franchissement...
- ♦ La stabilité hydraulique
résistance de la carapace, règle de filtre...
- ♦ La stabilité géotechnique
stabilité au grand glissement du talus, tassement...
- ♦ La résistance des matériaux et de leur disponibilité
résistance des blocs de carapace et du mur de couronnement...
- ♦ La construction et la maintenance
méthode de construction, accessibilité de l'ouvrage...



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes

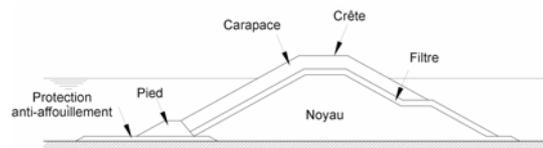
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

Les fonctions des enrochements naturels

Les matériaux naturels remplissent principalement 3 fonctions :

- (1) faire du volume (noyau)
- (2) assurer la protection des fines contre l'action de la mer (couches de filtre)
- (3) protéger le tout contre l'action de la houle (carapace)



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Études
Techniques Maritimes
et Fluviales

Caractéristiques des enrochements

Les caractéristiques des enrochements liées au dimensionnement sont principalement :

- La taille de l'enrochement et la granulométrie du matériau granulaire
→ M_{50} , D_{85} , D_{15}
- La masse volumique
- La forme des blocs d'enrochement
- Leur durabilité et résistance (à la fragmentation, à l'usure, au gel-dégel...)



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Études
Techniques Maritimes
et Fluviales

La carapace (1)

Formule d'Hudson

$$M_{50} = \frac{H^3 \rho_s}{K_D \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} - 1 \right)^3 \cot \alpha}$$

avec :

- M_{50} : masse médiane de la carapace (t)
- H : hauteur de la houle de projet ($H_{1/3}$ ou $H_{1/10}$)
- ρ_s : masse volumique du matériau (t/m³)
- ρ_w : masse volumique de l'eau de mer (t/m³)
- α : pente de l'ouvrage
- K_D : coefficient de stabilité, dépendant du dommage admissible, de la forme du blocs, du déferlement ou non de la houle



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

La carapace (2)

Formule de Van der Meer

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 6.2 P^{0.18} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \xi_m^{-0.5} \quad \text{si } \xi_m < \xi_c \quad (\text{déferlement plongeant})$$

$$\xi_c = \left[6.2 P^{0.31} \sqrt{\tan \alpha} \right]^{1/P+0.5}$$

$$\frac{H_s}{\Delta D_{n50}} = 1.0 P^{-0.13} \left(\frac{S_d}{\sqrt{N}} \right)^{0.2} \sqrt{\cot \alpha} \xi_m^P \quad \text{si } \xi_m \geq \xi_c \quad (\text{déferlement gonflant})$$

- N = nombre de vague pendant la tempête "projet"
- H_s = hauteur de houle significative "de projet" au pied de la structure
- D_{n50} = diamètre nominal dépassé par 50% des blocs = $(M_{50}/\rho_s)^{1/3}$
- $\Delta = \rho_s/\rho_w - 1$
- ξ_m = coefficient de déferlement utilisant la période moyenne de la houle T_m (s);
 $\xi_m = \tan \alpha / \sqrt{(2\pi/g H_s / T_m^2)}$
- P = coefficient de perméabilité ; = 0.5 pour digues à talus avec carapace en 2 couches; l'utilisation d'un géotextile réduit la perméabilité ce qui peut conduire à l'utilisation de blocs plus lourds
- S_d = niveau de dégâts
 - 0.5 = absence de dégâts
 - 2 à 3 = dégâts acceptables



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

La carapace (3)

Paramètres importants influençant la taille des enrochements :

- La houle de projet
 - ♦ Nécessité de connaître le climat de houle et de définir le niveau de protection souhaité
- Pente de l'ouvrage
 - ♦ En générale, la pente adoptée est très souvent celle qui correspond au talus naturel des matériaux déversés dans l'eau, i.e. 4/3 et 3/2
 - ♦ Possibilités de réduire la pente pour diminuer la taille des blocs ou pour réduire la réflexion à 2/1 ou 3/1
- Masse volumique du matériau
 - ♦ Une masse volumique élevée a un effet favorable sur la stabilité
 - ♦ Par ex. un enrochement de 2.3 t/m³ doit avoir un poids 1.8 fois supérieur à celui d'un enrochement de 2.65 t/m³ pour avoir la même stabilité face à la houle



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes

Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

La carapace (4)

Impact de d'autres paramètres :

- Influence de la gradation du matériau (D_{85}/D_{15})
 - ♦ Formules de dimensionnement valides que pour $D_{85}/D_{15} < 2.25$
 - ♦ Augmentation des dommages
- Influence de la forme des blocs d'enrochements
 - ♦ Enrochements de formes arrondies moins stables (perte d'imbrication)
- Influence du placement et du rangement des blocs
 - ♦ Augmentation de la stabilité si le placement est ordonné (carapace plus dense)
 - ♦ Mais difficile à réaliser, nécessite des blocs d'enrochement parallélépipédiques, augmentation du franchissement et de la réflexion de la houle



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes

Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

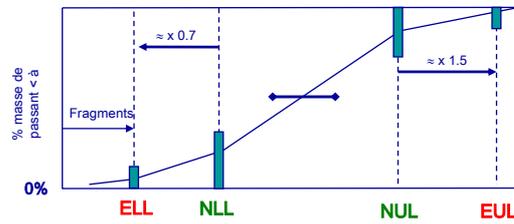
CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

La carapace (5)

19

Choix de la catégorie à adopter

$M_{50} \rightarrow M_{\text{moyen}}$
 \rightarrow classe granulaire
 (standard ou non standard EN13383)



Class designation	ELL	NLL	NUL	EUL	M_{moyen}	
Passing requirements	< 5%	< 10%	> 70%	> 97%	lower limit	upper limit
Heavy	kg	kg	kg	kg	kg	kg
10000-15000	6500	10000	15000	22500	12000	13000
6000-10000	4000	6000	10000	15000	7500	8500
3000-6000	2000	3000	6000	9000	4200	4800
1000-3000	700	1000	3000	4500	1700	2100
300-1000	200	300	1000	1500	540	690



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
 Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
 2 février 2006

CETMEF
 Centre d'Études
 Techniques Maritimes
 et Fluviales

La carapace (6)

20

Taille des enrochements disponibles
 Carrières de bonne qualité difficilement exploitables
 Contraintes environnementales (par ex. passage de camion)



Recours à des solutions alternatives
 Blocs artificiels
 Digue à berme



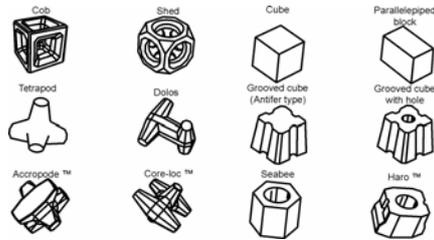
Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
 Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
 2 février 2006

CETMEF
 Centre d'Études
 Techniques Maritimes
 et Fluviales

La carapace (7)

21

- Blocs artificiels :



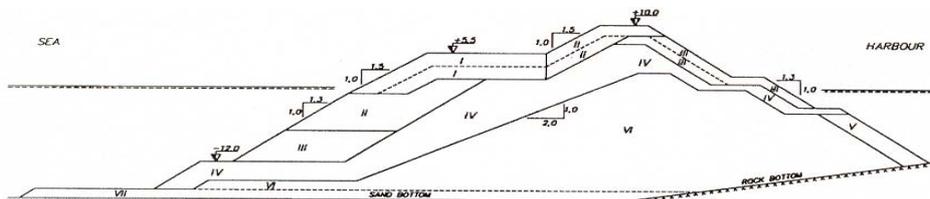
Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
 Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
 2 février 2006

CETMEF
 Centre d'Études
 Techniques Maritimes
 et Fluviales

La carapace (8)

22

- Digue à berme
 - Construite en Islande et Norvège
 - Reprofilable
 - Taille des enrochements inférieure
 - Utilisation de la totalité de la production de la carrière



Sirevåg berm breakwater cross-section – statically stable with a multi-layer berm
 Stone classes: Class I : 20 – 30 t, Class II: 10 – 20 t, Class III: 4 – 10 t, Class IV (filter): $M_{50} = 1.6$ t.
 Class V: $M_{50} = 1.2$ t. Class VI: Core, quarry run.



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
 Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
 2 février 2006

CETMEF
 Centre d'Études
 Techniques Maritimes
 et Fluviales

Les couches filtres

23

- Situées :
 - entre la carapace et le noyau
 - entre le noyau et le terrain naturel
- Rôle de filtre en empêchant les matériaux les plus fins de passer à travers les couches de matériaux plus grossiers
- Les règles de filtres :
 - Stabilité de l'interface entre les couches
 - Stabilité interne de la couche granulaire
- Utilisation au mieux de la production de la carrière vis-à-vis de la carapace
- Alternative : mise en place d'un géotextile



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

Le noyau

24

- Il est composé d'enrochements non classés, tout-venant de granulométrie étendue
- Les éléments fins doivent être limités (risque de tassement préjudiciable, lessivage de ces éléments)
 - augmentation de la porosité et de la perméabilité
 - augmentation de la transmission de l'énergie de la houle à travers le massif
- La géométrie du noyau est dictée par :
 - La houle résiduelle en période de travaux
 - La méthode de construction (tirant d'eau des barges ou accès des véhicules de travaux pour déversement des matériaux)



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Etudes
Techniques Maritimes
et Fluviales

Vérifications à effectuer :

- S'assurer de la bonne utilisation de la production de la carrière
- Tester les profils sur modèles physiques
- Prendre en compte les méthodes de construction
- Inclure la maintenance de l'ouvrage en service



Pour plus de détails...

- L'utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes est détaillée dans la nouvelle version du Rock Manual 2006
 - Chapitre 3 : Matériaux
 - Chapitre 5 : Méthode de dimensionnement
 - Chapitre 6 : Ouvrages maritimes
- Site du CETMEF : www.cetmef.equipement.gouv.fr



Merci de votre attention



Utilisation des enrochements dans les ouvrages maritimes
Journée « enrochements » du CFBR – CFGI – CFMR – CFMS
2 février 2006

CETMEF
Centre d'Études
Techniques Maritimes
et Fluviales