

8. Tenue à la mer des talus en enrochements

8.1. Introduction

Les talus en enrochements prennent une place de plus en plus importante dans la construction des ouvrages maritimes défensifs. Cela tient à plusieurs raisons qui sont leur facilité de construction et d'entretien, leur bonne tenue à la mer, et leur coût souvent plus faible que celui des autres types de constructions.

Ce chapitre est consacré à l'étude de la tenue à la mer des talus en enrochements en profondeur constante.

8.2. Section de la digue

La digue en enrochements est implantée dans une profondeur d'eau de 12 mètres. Sa cote d'arasée est établie à 14.50 mètres au dessus du fond.

Pour des raisons de construction, le sommet du noyau doit être praticable en camion. Sa largeur minimale est donc de 3.5 mètres.

La figure 8.1 présente le schéma de principe. La pente extérieure est de 2/1 tandis que le talus intérieur est un peu plus raide, de 4/3.

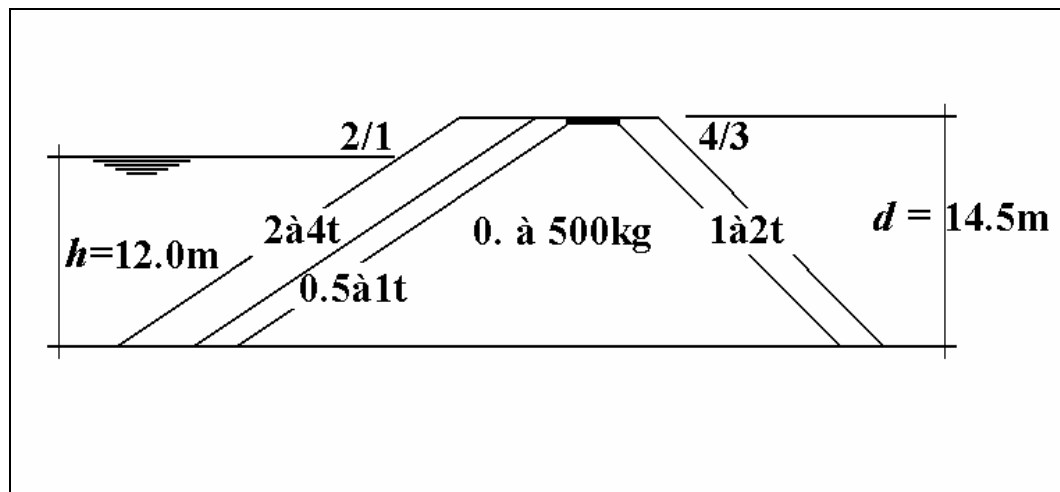


Figure 8.1 : Schéma de principe de la section d'une digue en enrochements.

Les caractéristiques générales adoptées pour la digue en enrochements (figure 8.1) sont données dans le tableau 8.1.

Cote d'arasée	14.50 m
Profondeur moyenne	12.00 m
Dalle de circulation en béton armé	
largeur	3.50 m
épaisseur	0.30 m
Noyau en tout venant	0 à 500 kg
Filtre carapace extérieure	
masse des blocs	0.5 à 1 t
pente	2/1
épaisseur (2 couches)	1.40 m
Carapace extérieure	
masse des blocs	2 à 4 t
pente	2/1
épaisseur (2 couches)	2.30 m
Carapace du môle	
masse des blocs	2 à 4 t
pente	2/1
épaisseur (2 couches)	2.30 m
Carapace intérieure	
masse des blocs	1 à 2 t
pente	4/3
épaisseur	1.80 m

Tableau 8.1 : Caractéristiques générales de la digue.

8.3. Echantillonnage de la carapace

Pour évaluer la stabilité des talus des digues en enrochements, il existe de nombreuses formules empiriques fondées sur l'analyse dimensionnelle. La plus utilisée d'entre elles est, sans doute, la formule de Hudson, ce qui lui confère l'un des meilleurs retours d'expérience.

En désignant par :

- M la masse minimale des enrochements de la carapace,
- H la hauteur crête à creux de la houle incidente,
- $\rho_s \approx 2650 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique du matériau des enrochements,
- $\rho_e \approx 1028 \text{ kg/m}^3$ la masse volumique de l'eau,
- $\cotg \alpha$ la pente du talus (longueur sur hauteur),
- K_d un coefficient adimensionnel issu de l'expérience.

elle s'écrit :

$$(8.1) \quad M = \frac{\rho_s H^3}{K_d \left(\frac{\rho_s}{\rho_e} - 1 \right)^3 \cotg \alpha}$$

Les essais sur modèles réduits qui ont permis d'obtenir le coefficient K_d ont généralement été réalisés avec une houle régulière. Ainsi, si dans le cas d'une houle régulière, la hauteur de la houle à prendre en compte dans la formule de Hudson est évidente, il n'en va pas de même dans le cas d'une houle irrégulière.

Il est d'usage de prendre la hauteur significative $H_s = \bar{H}_{1/3}$ qui est la moyenne des hauteurs du tiers des plus hautes vagues, et de faire les essais en houle régulière avec la hauteur correspondante. Certains auteurs préfèrent prendre la hauteur $\bar{H}_{1/10} \approx 1.27 H_s$ qui est la moyenne des hauteurs du dixième des plus hautes vagues. Cela revient à doubler le poids des blocs ! A noter que personne ne songe à utiliser la hauteur maximale H_{\max} qui ne correspond pas à un concept périodique.

Dans son ouvrage, René Bonnefille précise :

"Pratiquement, pour des carapaces en enrochements naturels disposés en vrac sur deux couches, on retiendra les valeurs suivantes :

- $K_d=3.5$: la carapace est stable,
- $K_d=5$: la carapace commence à être sculptée et à prendre un profil à trois pentes avec raidissement des parties hautes et basses du talus,
- $K_d=10$: quelques blocs de la carapace sont remaniés ; les dommages sont acceptables à conditions de pouvoir les réparer avant la tempête suivante.

Ceci montre qu'entre une carapace susceptible d'être légèrement endommagée et une carapace offrant toute sécurité, soit le rapport des poids des blocs est 4, soit la hauteur de la houle diminue de 35%."

Type de blocs	n	Porosité %	Mise en place	Houle déferlante		Houle non déferlante		Pente
				Corps	Musoir	Corps	Musoir	
Enrochements								
Blocs arrondis	2	38	En Vrac	1.2	1.1	2.4	1.9	3/1-3/2
	>3		En Vrac	1.6	1.4	3.2	2.3	3/1-3/2
Blocs anguleux	2	37 - 40	En Vrac	2.0	1.9	4.0	3.2	3/2
			"	"	1.6	"	2.8	2/1
			"	"	1.3	"	2.3	3/1
	>3		En Vrac	2.2	2.1	4.5	4.2	-
	2		Rangé	5.8	5.3	7.0	6.4	-
Parallélépipèdes	2	27	Rangé	7.0 - 20.0	-	8.5 - 24.0	-	-
Cubes béton	2			7.5				
Cubes américains	2	47	En Vrac	6.5	-	7.5	5.0	-
Tétrapodes et Quadripodes	2	50	En Vrac	7.0	5.0	8.0	6.0	3/2
		49	"	"	4.5	"	5.5	2/1
			"	"	3.0	"	4.0	3/1
Acropodes	1		Rangé	10.0	6.7	12.0	8.0	-
Hexapodes	2	47	En Vrac	8.0	5.0	9.5	7.0	-
Tribars	1	54	Rangé	12.0	7.5	15.0	9.5	-
	2		En vrac	9.0	8.3	10.0	9.0	3/2
	2		En vrac	"	7.8	"	8.5	2/1
	2		En vrac	"	6.0	"	6.5	3/1
Dolos	2	56	En Vrac	15.8	8.0	31.8	16.0	2/1
			"	"	7.0	"	14.0	3/1

Tableau 8.2 : Coefficient de Hudson pour différents types de blocs.

Le tableau 8.2 présente les coefficients de Hudson à prendre en compte pour différents types de blocs naturels ou artificiels.

Dans ces conditions, pour des blocs d'enrochements naturels anguleux en vrac sur au moins deux couches, lorsque la houle ne déferle pas avant d'arriver sur l'ouvrage, il est d'usage de prendre le coefficient K_d égal à 4 pour le corps de la digue et à 3.2 pour les musoirs.

En appliquant cette formule avec une hauteur significative de la houle de 3 mètres, la masse minimale des enrochements doit être de 2.1 tonnes sur le corps de la digue et de 2.6 tonnes sur son musoir. Pour une hauteur significative de la houle de 3.5 mètres, ces valeurs deviennent respectivement 3.3 tonnes et 4.1 tonnes. Il apparaît donc convenable d'adopter pour la carapace extérieure et les musoirs des enrochements de 2 à 4 tonnes. Par ailleurs, des blocs de 1 à 2 tonnes paraissent suffisants sur les faces internes de la digue.

Naturellement, la tenue des enrochements est également liée à la période de la houle incidente. La période la plus défavorable peut être identifiée à partir du nombre d'Iribaren-Battjes critique qui s'écrit :

$$(8.2) \quad I_{r \text{ crit}} = I_{r0} - \frac{1}{B}$$

Avec, d'après les travaux effectués par l'équipe de J. Feuillet & all. au LNH, pour des enrochements naturels et une pente de digue 2/1 : $I_{r0}=1.33$ et $B=-0.6627$.

D'où, en désignant par λ_0 la longueur d'onde de la houle incidente en grande profondeur :

$$(8.3) \quad I_{r \text{ crit}} = \frac{\text{tg } \alpha}{\sqrt{H / \lambda_0}} = 2.8$$

Il en résulte que la période la plus défavorable pour la stabilité des enrochements seront comprise entre 7.7s et 8.45s suivant que la hauteur significative considérée est de 3.0 mètres ou de 3.5 mètres.

A noter que pour des périodes significatives des spectres dimensionnants sont souvent inférieures à 6s pour les houles courtes et supérieures à 10s pour les houles longues océaniques. Dans le cas présent, les effets dus à la période de la houle ne sont pas critiques pour le dimensionnement des blocs. Il en résulte que la formule de Hudson, qui intègre ce phénomène sous forme d'enveloppe, n'est pas appliquée dans les conditions les plus sévères, ce qui justifie de ne pas surdimensionner les blocs.

Le tableau 8.3 rassemble les résultats de la formule de Hudson obtenus pour trois valeurs de la pente et pour trois coefficients. Sur fond vert les résultats concernant les blocs de 2 à 4 tonnes.

H_s	Cotg $\alpha = 1.6$			cotg $\alpha = 2.2$			cotg $\alpha = 2.5$		
	$K_d=4$	$K_d=5$	$K_d=10$	$K_d=4$	$K_d=5$	$K_d=10$	$K_d=4$	$K_d=5$	$K_d=10$
3.00 m	2.8 t	2.3 t	1.1 t	2.1 t	1.7 t	0.8 t	1.8 t	1.5 t	0.7 t
3.25 m	3.6 t	2.9 t	1.4 t	2.6 t	2.1 t	1.1 t	2.3 t	1.9 t	0.9 t
3.50 m	4.5 t	3.6 t	1.8 t	3.3 t	2.6 t	1.3 t	2.9 t	2.3 t	1.2 t
3.75 m	5.6 t	4.4 t	2.2 t	4.0 t	3.2 t	1.6 t	3.6 t	2.8 t	1.4 t
4.00 m	6.7 t	5.4 t	2.7 t	4.9 t	3.9 t	2.0 t	4.3 t	3.5 t	1.7 t
4.25 m	8.1 t	6.5 t	3.2 t	5.9 t	4.7 t	2.4 t	5.2 t	4.1 t	2.1 t
4.50 m	9.6 t	7.7 t	3.8 t	7.0 t	5.6 t	2.8 t	6.1 t	4.9 t	2.5 t
4.75 m	11.3 t	9.0 t	4.5 t	8.2 t	6.6 t	3.3 t	7.2 t	5.8 t	2.9 t
5.00 m	13.2 t	10.5 t	5.3 t	9.6 t	7.7 t	3.8 t	8.4 t	6.7 t	3.4 t
5.25 m	15.3 t	12.2 t	6.1 t	11.1 t	8.9 t	4.4 t	9.8 t	7.8 t	3.9 t
5.50 m	17.5 t	14.0 t	7.0 t	12.8 t	10.2 t	5.1 t	11.2 t	9.0 t	4.5 t
5.75 m	20.0 t	16.0 t	8.0 t	14.6 t	11.7 t	5.8 t	12.8 t	10.3 t	5.1 t
6.00 m	22.8 t	18.2 t	9.1 t	16.6 t	13.2 t	6.6 t	14.6 t	11.7 t	5.8 t
6.25 m	25.7 t	20.6 t	10.3 t	18.7 t	15.0 t	7.5 t	16.5 t	13.2 t	6.6 t
6.50 m	28.9 t	23.2 t	11.6 t	21.1 t	16.8 t	8.4 t	18.5 t	14.8 t	7.4 t

Tableau 8.3 : Masse des blocs d'enrochements en fonction de la hauteur de la houle pour trois pentes caractéristiques et trois coefficients de Hudson.

8.4. Caractéristiques des couches d'enrochements

En désignant par :

- M_{moy} (kg) la masse moyenne des enrochements de la couche d'enrochements,
- n le nombre de blocs dans l'épaisseur de la couche,
- k_{Δ} un coefficient empirique,
- ρ_s (kg/m³) la masse volumique du matériau des enrochements,
- P (%) La porosité moyenne de la couche d'enrochements,

l'épaisseur d'une couche de blocs d'enrochements est déterminée par la formule suivante :

$$(8.4) \quad e = nk_{\Delta} \left(\frac{M_{moy}}{\rho_s} \right)^{1/3}$$

Le nombre N de blocs nécessaires pour couvrir une surface A donnée s'écrit alors :

$$(8.5) \quad \frac{N}{A} = nk_{\Delta} \left(1 - \frac{P}{100} \right) \left(\frac{M_{moy}}{\rho_s} \right)^{-2/3}$$

Le tableau 8.4 indique pour différents types de blocs d'enrochements naturels ou artificiels les valeurs des coefficients à prendre en compte.

Type de bloc	n	Placement	k_{Δ}	$P(\%)$
Enrochements arrondis	2	En vrac	1.02	38
Enrochements anguleux	2 - 3	En vrac	1.00	37 - 40
Enrochements parallélépipédiques	2	Spécial	--	27
Cubes rainurés	2	En vrac	1.10	37
Cubes américains	2	En vrac	1.10	47
Tétrapodes	2	En vrac	1.04	50
Quadripodes	2	En vrac	0.95	49
Hexapodes	2	En vrac	1.15	47
Tribars	2	En vrac	1.02	54
Dolos	2	En vrac	0.94	56

Tableau 8.4 : Caractéristiques de différents blocs d'enrochements.

8.5. Caractéristiques des couches internes

Contrairement à la carapace qui doit être composée de blocs homogènes afin d'obtenir une forte porosité destinée à consommer l'énergie de la houle et à limiter les sous pressions, les couches de transition doivent présenter une granulométrie assez étendue pour participer à l'étanchéité de la digue.

La première sous couche de la digue, située juste sous la carapace, doit avoir une épaisseur d'au moins deux blocs ($n=2$) dont la masse doit être au moins du $1/10^{\text{ème}}$ de celle des blocs de la carapace dont le coefficient de Hudson $K_d < 12$ (enrochements naturels et certains blocs artificiels) et au moins $1/5^{\text{ème}}$ de celle des blocs artificiels de la carapace dont le coefficient de Hudson $K_d > 12$.

La sous couche suivante doit avoir une épaisseur minimale équivalente à celle de deux blocs de la couche précédente, et la masse de ses blocs doit être au moins de $1/20^{\text{ème}}$ de celle des blocs de la couche précédente.

Pour des enrochements de granulométrie mélangée, ou du tout-venant de carrière, les diamètres des deux couches successives doivent respecter la relation (8.6) appelée règle de filtre de Terzaghi :

$$(8.6) \quad 4d_{15}(\text{dessous}) < d_{15}(\text{dessus}) < 4d_{85}(\text{dessous})$$

8.6. Franchissement des talus en enrochements

Le franchissement frontal d'une digue à talus est caractérisé par la hauteur au dessus du niveau d'eau moyen que peut atteindre l'eau des vagues qui se brisent sur la digue. L'étude de cette hauteur, appelée run-up et notée R_u s'effectue à partir du paramètre adimensionnel R_u/H qui est fonction du nombre d'Iribaren-Battjes :

$$(8.7) \quad \frac{R_u}{H} = f(I_r) = 0.67 I_r^{0.51}$$

D'après la méthode proposée par Ahrens et Oorschoot et préconisée par le CERC et par le LNH, dans le cas d'une houle irrégulière, le risque de franchissement frontal d'une digue à talus peut être évalué à partir de l'expression :

$$(8.8) \quad \frac{R_u(p)}{H_s} = 0.67 \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{2\pi H_s / g T_p^2}} \right)^{0.51} \sqrt{\frac{\ln p}{2}}$$

dans laquelle les différents symboles désignent respectivement :

- $p = \operatorname{Prob}[R_u > R_u(p)]$: la probabilité que R_u soit supérieur à $R_u(p)$,
- R_u (m) : la hauteur au dessus de la surface libre atteinte par l'eau,
- H_s (m) : la hauteur significative de la houle,
- $\operatorname{cotg} a = 2/1$: la pente de la digue,
- T_s (s) : la période significative de la houle.
- $T_p \approx 1.05 T_s$ (s) : la période de pic du spectre de la houle d'après Goda.

Soit en introduisant la période significative de la houle :

$$(8.9) \quad \frac{R_u(p)}{H_s} = 0.67 \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{H_s / 1.72 T_s^2}} \right)^{0.51} \sqrt{\frac{\ln p}{2}}$$

Le tableau 8.5 présente le run-up et le débit de franchissement associé à une probabilité donnée pour $H_s = 1.5$ mètre et $T_p = 7$ s. Le débit a été évalué avec la formule de Saville, avec α de l'ordre de 0.05 et Q_0^* de l'ordre de 0.02.

P	R_u (m)	Q (m ³ /s/m)
10^{-1}	2.063	0.007
10^{-2}	2.918	0.029
10^{-3}	3.574	0.054
10^{-4}	4.127	0.078
10^{-5}	4.614	0.100
10^{-6}	5.054	0.120

Tableau 8.5 : Franchissement associé à une probabilité d'occurrence.