

Evaluation de la fiabilité des digues à talus

Auteurs : HAFID ANAS¹

¹Artelia, 6 Rue de Lorraine, Echirolles, France, e-mail: anas.hafid@arteliagroup.com

RESUME :

Les pratiques actuelles de dimensionnement des carapaces de digues à talus reposent sur une approche déterministe. La sécurité est prise en compte au niveau action par le temps de retour de la tempête de projet et côté résistance par une réduction du paramètre empirique et par le choix de dimensionner avec un niveau nul ou très faible de dommages. La montée en puissance des études de fiabilité (études de danger) et du dimensionnement par les Eurocodes nécessite une évolution significative de ces méthodologies, règles et formules de dimensionnement à laquelle doit faire face l'ingénierie maritime qui est mal préparée à cela.

Les études de danger nécessitent d'apprécier les situations de ruine de l'ouvrage pour la vérification de son niveau de fiabilité. Nous présenterons deux exemples concrets d'une telle vérification sur deux digues récemment construites en France : l'extension du port de pêche de la Cotinière (Ile d'Oléron) et la reconstruction de la digue de Cerbère (Pyrénées orientales). Nous montrerons que les calculs nécessitent de mettre en place des intervalles de confiance, et d'inclure dans les publications scientifiques des informations sur la dispersion et sur les incertitudes, informations qui ne sont pas facilement accessibles dans la littérature et qui nécessitent parfois de re-analyser les bases de données des essais sur modèle physiques qui servent à calibrer les formules de stabilité.

Enfin nous concluons sur la nécessité de mettre à jour les formules classiques de prédimensionnement en y intégrant des intervalles de confiance, cela concerne notamment l'ensemble des blocs artificiels. Ainsi que la nécessité de développer des nouvelles formules ou méthodologie de calcul représentant mieux la physique des phénomènes.

MOTS CLEFS : Dignes à talus, Fiabilité, Stabilité, Eurocode, Accropode

ABSTRACT :

Current practices for the design of coastal breakwaters are based on a deterministic approach. Safety is considered at the action level by the choice of a return period and at the resistance level by the application of implicit factor of reduction and by the choice of an acceptable damage level. The increasing demand for reliability studies (hazard studies)

and the need for coastal structures to be compliant with Eurocodes requires a significant evolution of breakwaters design methodologies, rules, and dimensioning formulas which maritime engineering is ill-prepared to face.

Reliability studies require an assessment of the situations in which the structure could fail in order to verify if the probability of failure is acceptable. We will present two practical examples of such a verification on two breakwaters recently built in France: the extension of the Cotinière fishing harbour (Ile d'Oléron), and the reconstructed Cerbère breakwater (Eastern Pyrenees).

Finally, we will conclude on the need to update existing stability formulas by including information about dispersion and uncertainty. This concerns in particular all the artificial concrete blocks.

KEYWORDS: Breakwater, Reliability, Stability, Eurocode, Accropode

1. Introduction

Le développement de l'approche semi-probabiliste de l'Eurocode pour un mode de ruine d'un ouvrage quelconque nécessite :

- Une bonne connaissance des phénomènes physiques liées au mode de ruine, ainsi que de formaliser mathématiquement ces phénomènes sous la forme d'une fonction de performance (ou d'état limite).
- Une bonne connaissance sur les sources d'incertitudes liées aux différents paramètres de la fonction de performance, ainsi que sur la loi statistique qui permettra de modéliser ces incertitudes.
- L'évaluation de la probabilité d'occurrence de l'événement « ruine » en utilisant une méthode fiabiliste de niveau 2 (quasi-probabiliste) ou 3 (probabiliste).
- De fixer un niveau de risque acceptable, par rapport auquel les coefficients partiels seront calibrés.

Le passage des pratiques actuelles de conception de digue à talus à l'approche semi-probabiliste de l'Eurocode nécessitera dans un premier temps d'évaluer le niveau de fiabilité des ouvrages existants.

2. Exemples de vérification du niveau de fiabilité

1.1 Cas d'une digue en enrochements

Description de la digue

Nous avons évalué le niveau de fiabilité d'un tronçon de 95 m de longueur de la digue Ouest de l'extension du port de pêche de la Cotinière. Le tronçon est constitué d'un noyau en tout-venant calcaires ; le talus côté mer de pente 2/1 est recouvert d'une sous-couche en blocs

calcaires de 100 à 400 kg, puis d'une carapace extérieure constituée de deux couches d'enrochements dioritiques de 3000 à 5000 kg d'une densité de 2900 kg/m³. Le talus côté chenal de pente 3/2 est recouverts de manière identique au talus côté mer. La carapace est ancrée dans le rocher par une bêche.

Critères de stabilité retenus

Les digues doivent pouvoir résister aux conditions de houle centennale avec des dommages nuls.

Niveaux d'eau et hauteurs extrêmes de la houle

Les niveaux extrêmes de pleins mer (hors setup) sont indiqués ci-dessous. La pente moyenne des fonds devant l'ouvrage est de 1%.

Tableau 1. Niveaux d'eau extrêmes de pleins mer (hors setup)

Période de retour	1 an	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Niveau d'eau	+ 6.30 m ZH	+ 6.50 m ZH	+ 6.60 m ZH	+ 6.70 m ZH	+ 6.75 m ZH

Une série temporelle de données de houle au large sur 24 ans a été transférée jusqu'au pied de l'ouvrage à l'aide d'une modélisation numérique de troisième génération (logiciel SWAN). Les hauteurs de houle significatives ont été ajustées avec une loi de Weibull, et les deux équations ci-dessous permettent d'estimer la hauteur de houle significative pour une période de retour donnée et inversement.

$$H_{m0} = u_s + \sigma \times [\ln(\lambda T)]^{1/k} \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{\lambda} + \exp \left[\left(\frac{H_{m0} - u_s}{\sigma} \right)^k \right] \quad (2)$$

Où H_{m0} indique la hauteur de houle significative spectrale, T la période de retour, u_s le seuil (analyse POT), σ , λ et k des paramètres statistiques de la loi de Weibull.

Tableau 2. Paramètres statistiques de la loi de Weibull – Dignes de la Cotinière

Paramètre	u_s	λ	σ	k
Valeur	2.108	1.57	0.164	1.593

Les périodes associées aux houles les plus fortes sont de l'ordre de 17 s.

Evaluation du niveau de fiabilité de la digue

Nous allons évaluer la probabilité d'occurrence des événements suivants :

- Évènement A : « L'ouvrage ne respecte pas la condition de début de dommage pour la houle centennale ».
- Évènement B : « L'ouvrage subit un niveau de dommage de ruine pour la houle centennale ».
- Évènement C : « L'ouvrage ne respecte pas la condition de début de dommage ».
- Évènement D : « L'ouvrage subit un niveau de dommage de ruine ».

Nous supposons que les 4 événements définis précédemment concernent à un endommagement de la digue à la suite d'une tempête unique. Cela permet d'éliminer le cas de ruine par fatigue.

Pour une pente de talus de 2/1, nous considérons que le début de dommage correspond à $S_d = 2$, et que la ruine correspond à $S_d = 8$. Nous pouvons exprimer les probabilités d'occurrences de la manière suivante :

$$P(A) = Prob(S_d \geq 2 | H_{m0} = H_{m0,100 \text{ ans}}) \times Prob(H_{m0} = H_{m0,100 \text{ ans}}) \quad (3)$$

$$P(B) = Prob(S_d \geq 8 | H_{m0} = H_{m0,100 \text{ ans}}) \times Prob(H_{m0} = H_{m0,100 \text{ ans}}) \quad (4)$$

$$P(C) = Prob(S_d \geq 2) \quad (5)$$

$$P(D) = Prob(S_d \geq 8) \quad (6)$$

La digue se situe en eau peu profonde. Nous pourrions donc évaluer le niveau de dommage à l'aide de la formule de Van der Meer en eau peu profonde, qui s'exprime de la manière suivante :

$$S_d = \sqrt{N} \times \left[\frac{N_s}{c_{pl} \times P^{0.18} \times \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \times \xi_{s-1,0}^{-0.5}} \right]^5 \quad \text{si } \xi_{s-1,0} < \xi_{cr} \quad (7)$$

$$S_d = \sqrt{N} \times \left[\frac{N_s}{c_s \times P^{-0.13} \times \left(\frac{H_s}{H_{2\%}}\right) \times \sqrt{\cot \alpha} \times \xi_{s-1,0}^P} \right]^5 \quad \text{si } \xi_{s-1,0} \geq \xi_{cr} \quad (8)$$

La méthode de Battjes (2000) améliorée par Mai (2010) [1] a été utilisée pour estimer les hauteurs de houle $H_{1/3}$ et $H_{2\%}$ en fonction de H_{m0} en pied d'ouvrage.

Le tableau ci-dessous synthétise les caractéristiques statistiques des paramètres utilisés pour évaluer la probabilité d'occurrence des 4 événements.

Tableau 3. Caractéristiques statistiques utilisées pour évaluer la fiabilité de la digue de la Cotinière

Paramètre	Description	Moyenne	Ecart type	Distribution
H_{m0} [m]	Hauteur de houle significative	Loi de Weibull ou loi Normale selon l'événement		
h [m]	Profondeur d'eau en pied d'ouvrage (y compris setup)	7.00	---	Déterministe
T_p [s]	Période de pic	17 s	---	Déterministe
m [-]	Pente des fonds	0.01	---	Déterministe
N [-]	Nombre de vague d'une tempête	3000	---	Déterministe
c_{pl} [-]	Coefficient	8.40	0.70	Normale
c_s [-]	Coefficient	1.30	0.15	Normale
Δ [-]	Densité relative déjaugée	1.83	5% x Δ	Normale
Dn50 [m]	Diamètre nominal moyenne	1.15	5% x Dn50	Normale
P [-]	Perméabilité de l'ouvrage	0.40	---	Déterministe
Cot α [-]	Pente du talus côté mer	2.00	---	Déterministe

Nous allons évaluer les événements A et B en modélisant la hauteur de houle H_{m0} par une loi normale de moyenne $H_{m0,100 \text{ ans}} = 2.56$ m et d'écart type égale à 0.06 m. Les événements C et D seront modélisés en utilisant la loi de Weibull. Nous obtenons les résultats suivants :

$$P(A) = 4.67 \times 10^{-2} \times Prob(H_{m0} = H_{m0,100 \text{ ans}}) = 4.67 \times 10^{-4} \quad (\beta_{1 \text{ an}} = 3.3) \quad (9)$$

$$P(B) = 1.70 \times 10^{-4} \times Prob(H_{m0} = H_{m0,100 \text{ ans}}) = 1.70 \times 10^{-6} \quad (\beta_{1 \text{ an}} = 4.6) \quad (10)$$

$$P(C) = 5.14 \times 10^{-3} \quad (\beta_{1 \text{ an}} = 2.6) \quad (11)$$

$$P(D) = 1.5 \times 10^{-5} \quad (\beta_{1 \text{ an}} = 4.2) \quad (12)$$

En conclusion, cet exemple illustre qu'avec des hypothèses simplistes, il est possible d'évaluer la fiabilité d'une digue à talus en enrochement. L'exemple illustre aussi que la ruine n'a pas lieu uniquement à cause de l'action de la houle, mais aussi à cause d'une configuration défavorable de l'ouvrage. Cela dit, afin d'évaluer plus correctement la probabilité de défaillance, il nous faut une méthodologie pour caractériser statistiquement des paramètres comme le nombre de vagues, la pente des fonds, ainsi que la perméabilité de l'ouvrage. Il nous faut aussi un modèle de calcul plus performant, permettant de prendre en compte l'influence de la variabilité du niveau d'eau, la progression des dommages (fatigue), ainsi que la densité des enrochements composant la carapace (imbrication, porosité).

1.2 Cas d'une digue en blocs artificiels

Description de la digue

La nouvelle digue de Cerbère est constituée d'un noyau en tout-venant de 1 à 500 kg. Le talus est recouvert d'une couche filtre d'enrochements de 100 à 300 kg, puis d'une sous couche d'enrochements de 1500 à 3000 kg, puis d'une carapace en Accropodes de 9 m³ sur une pente de 4/3. Le pied de la digue est protégé par une butée d'enrochements de 4000 kg.

Niveaux d'eau et hauteurs extrêmes de la houle

Le niveau d'eau extrême de projet est considéré égale à +0.70m IGN69. La hauteur de houle significative centennale est égale à 7.3 m. Les hauteurs significatives ont été ajustées avec une loi de Weibull dont les caractéristiques statistiques sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4. Paramètres statistiques de la loi de Weibull – Dignes de Cerbère

Paramètre	u_s	λ	σ	k
Valeur	2.0	69	0.214	0.679

L'ouvrage est situé en eau profonde. Nous pouvons supposer que $H_{1/3} = H_{m0}$.

Critères de stabilité retenue

La houle de projet qui a été retenue pour le dimensionnement de la digue est la houle trentennale (6.27 m) associée au niveau d'eau extrême de projet. La digue doit résister à cette condition avec un niveau de dommage nul.

Evaluation du niveau de fiabilité de la digue

Les formules de stabilité (semi-empiriques) pour les blocs artificiels n'ont pas atteint le même niveau de développement que celui des carapaces en enrochements. La sécurité est incluse dans le coefficient de stabilité K_d ou N_s . Les valeurs commercialisées incluent souvent un facteur de sécurité (1.5 minimum pour les Accropodes). Nous avons pris des hypothèses spéculatives dans ce travail sur les blocs Accropode pour tester la méthode d'évaluation.

Van der Meer donne les critères de stabilité (sans coefficients de sécurité) ci-dessous :

- Un nombre de stabilité $N_{s,1} = 3.74$ avec un écart type de 0.20 pour la condition de début de dommage.

- Et $N_{s,2} = 4.10$ avec un écart type de 0.20 avec un écart type de 0.20 pour une condition de ruine.

Nous ne disposons pas d'informations suffisantes pour définir une fonction de performance qui décrit bien les phénomènes physiques liées à la progression des dommages. Nous allons évaluer la digue avec la fonction de performance simpliste définie ci-dessous.

$$Z = N_s - \frac{H_s}{\Delta D_n} \quad (13)$$

Nous allons évaluer la probabilité de défaillance des événements suivants :

- Évènement E : « L'ouvrage ne respecte pas la condition de début de dommage pour la houle trentennale ».
- Évènement F : « L'ouvrage subit un niveau de dommage de ruine pour la houle trentennale ».
- Évènement G : « L'ouvrage ne respecte pas la condition de début de dommage ».
- Évènement H : « L'ouvrage subit un niveau de dommage de ruine ».

Nous obtenons les résultats suivants :

$$P(E) = 3.84 \times 10^{-6} \times Prob(H_{m0} = H_{m0,30 \text{ ans}}) = 1.28 \times 10^{-7} (\beta_{1 \text{ an}} = 5.1) \quad (14)$$

$$P(F) = 9.17 \times 10^{-9} \times Prob(H_{m0} = H_{m0,30 \text{ ans}}) = 1.72 \times 10^{-10} (\beta_{1 \text{ an}} = 6.3) \quad (15)$$

$$P(G) = 3.44 \times 10^{-5} (\beta_{1 \text{ an}} = 4.0) \quad (16)$$

$$P(H) = 1.69 \times 10^{-5} (\beta_{1 \text{ an}} = 4.1) \quad (17)$$

En conclusion, cet exemple comme celui de la Cotinière illustre qu'avec des hypothèses simplistes, il est possible d'évaluer la fiabilité d'une digue à talus en Accropodes. Mais il ne s'agit que d'une première approche. En l'absence d'un modèle qui permet représenter plus fidèlement la physique du comportement de la digue, tout calcul de probabilité de défaillance est inutile. En effet, des paramètres importants comme la densité des blocs (caractérisant l'imbrication) et la perméabilité de la digue sont absents dans cette étude, et à ce jour, aucune formule semi-empirique ne les prennent en compte.

3. Conclusions et perspectives

La défaillance d'une digue à talus par les agents hydrauliques est le résultat d'un ou plusieurs modes de ruines qui ont été répertoriés par exemple dans le Rock Manual [2] (section 6.1.3.4). A ce jour, nous avons exploré dans notre travail un seul mode de ruine (défaillance de la carapace du talus côté mer par une tempête) et évalué les indices de fiabilité de seulement deux ouvrages à titre informatif (dignes de la Cotinière et de Cerbère). Ce travail donne une idée sur le niveau d'information qu'on peut extraire des formules de stabilité existantes, mais il reste insuffisant pour justifier de la défaillance même pour ce seul mode de ruine car les effets de la fatigue n'ont pas été pris en compte.

D'ailleurs, nous avons mené une recherche bibliographique afin de mettre en évidence le manque d'analyse statistique et physique dans nombre de formules de stabilité semi-

empiriques utilisées pour dimensionner les digues à talus. Notre analyse de l'état de l'art nous a conduit aussi à conclure, qu'à ce jour, il n'est pas possible de justifier par le calcul la stabilité hydraulique d'une digue à talus. Ainsi par extension, on ne peut pas prétendre évaluer correctement le niveau de fiabilité des digues à talus. Aujourd'hui, seule la modélisation physique permet de conclure sur la stabilité de la digue.

Nous recommandons :

- De donner une attention particulière à la manière avec laquelle les événements sont définis.
- De réaliser plus de tests sur modèle physique sur les différents blocs artificiels actuellement mis en œuvre afin de combler la lacune par rapport à la stabilité des carapaces en enrochements.
- De donner plus d'indications sur les caractéristiques statistiques des divers paramètres physiques.

4. REFERENCES

- [1].Stephan Mai, Jens Wilhelmi, and Ulrich Barjenbruch. Wave height distributions in shallow waters. Coastal Engineering, page 2, 2010.
- [2].CETMEF. The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering, volume 683. Ciria, 2007.