

Projet d'Hydrodynamique Littorale et côtière 2024-2025

Etude de la surverse due aux vagues au dessus d'une digue de protection

*Le projet est a effectuer en binôme et à rendre pour le vendredi 20 décembre*

## 1 Contexte de l'étude



Figure 1: Exemples d'ouvrages de protection

De nombreux littoraux sont équipés d'ouvrages artificiels (Figure 1) destinés à protéger les zones littorales des inondations pouvant être provoquées par les



Figure 2: Exemples de surverse due aux vagues au dessus d'une digue de protection

surcôtes (élévation du niveau moyen de la mer) et les vagues (Figure 2) lors d'évènements de tempêtes ou de phénomènes plus localisée comme les ouragans.

Le phénomène de surverse, présente des risques majeurs pour les biens et les personnes présents dans les zones protégées. Nous pouvons citer, par ordre de gravité, (i) les risques d'inondation par les volumes d'eau apportés par la surverse, (ii) les risques liés à la circulation des personnes et des véhicules sur les ouvrages, souvent utilisés pour celà (Figure 2), (iii) les inondations provoquées par l'endommagement des ouvrages de protection par la surverse, qui entraîne alors des écoulements par les brèches (Comme lors des catastrophes dûes à la tempête Xynthia en Charente Maritime en 2010 et à l'ouragan Katrina à la Nouvelle-Orléans en 2005 par exemple).

Dans ce projet, nous nous proposons d'étudier le phénomène de surverse provoquée par les vagues au dessus d'un ouvrage qui est schématisé sur la Figure 3. L'ouvrage possède une géométrie classique pour des ouvrages réalisés principalement en terre, avec deux faces inclinées d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontale séparées par une berme horizontale au sommet de l'ouvrage (qui peut souvent être utilisée pour la circulation des piétons ou des véhicules).

La hauteur totale entre le pied et la crête de la digue est  $h_{ouvrage}$  (non indiquée). Sur la Figure 3 sont utilisées d'une part la profondeur d'eau au pied de l'ouvrage  $h$  et d'autre part la hauteur de franc-bord  $R_c$  (distance entre la position moyenne de la surface libre et le sommet de l'ouvrage). Une surcôte correspondra donc à l'augmentation de  $h$  et par voie de conséquence à la diminution du franc-bord  $R_c$ . La situation  $R_c \leq 0$  correspondrait à une surverse provoquée par la surcôte elle-même et ne sera pas étudiée ici.

L'intensité des vagues arrivant sur l'ouvrage, qui ne sont pas monochromatiques dans la réalité, est caractérisée par leur hauteur significative  $H_{m0}$  au pied de l'ouvrage, grandeur statistique représentant leur hauteur. Ces vagues possèdent également une période caractéristique  $T$ .

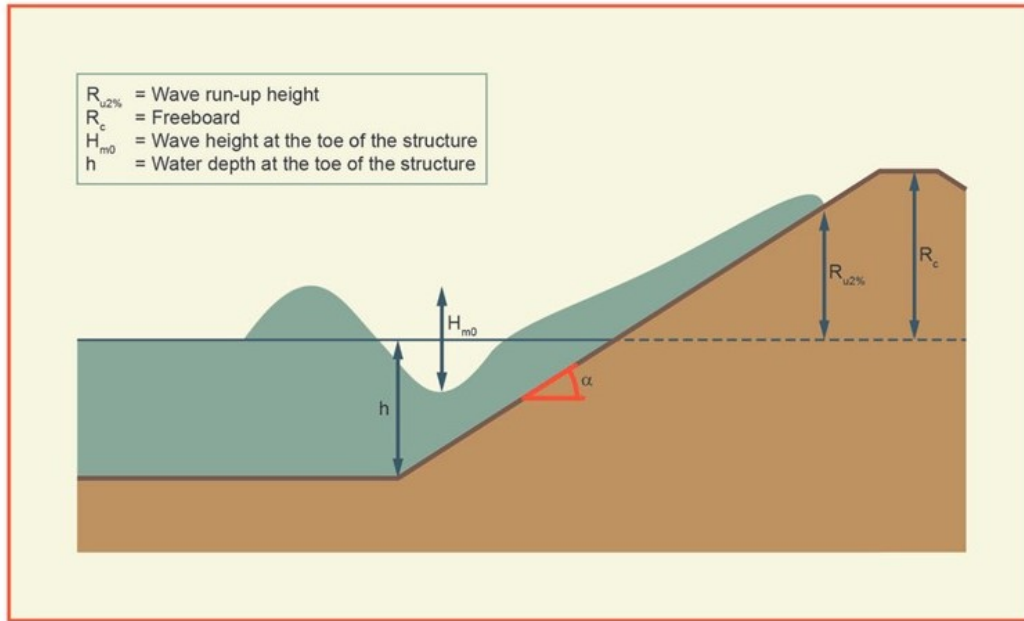


Figure 3: Configuration de la digue

Afin de déterminer l'intensité de la surverse provoquée par les vagues, de nombreuses études ont été conduites, principalement en laboratoire à l'aide de canaux et de bassins à houle et plus récemment par modélisation numérique, pour déterminer quel est le débit de surverse par unité de longueur d'ouvrage  $q$  (en l/s/m) en fonction de la géométrie de l'ouvrage et des caractéristiques de l'état de mer (surcôte et vagues). L'ensemble de ces données a été utilisée pour proposer une relation permettant d'évaluer  $q$ :

$$\frac{q}{\sqrt{gH_{m0}^3}} = \frac{0,026}{\sqrt{\tan \alpha}} \gamma_b \xi \exp \left[ - \left( 2,5 \frac{R_c}{\xi H_{m0} \gamma_b \gamma_f \gamma_\beta \gamma_v} \right)^{1/3} \right] \quad (1)$$

où :

- $\xi = \frac{\tan \alpha}{(H_{m0}/L_m)^{1/2}}$  est un nombre d'Iribaren (rapport de la pente de la digue à la racine de la cambrure de la vague laquelle est batie sur la hauteur spécifique de houle au pied de la structure  $H_{m0}$  et sur la longueur d'onde en profondeur infinie  $L_m = gT^2/2\pi$ . Ce paramètre permet de représenter la manière dont les vagues incidentes vont déferler lorsqu'elles atteignent la face inclinée de la digue côté large.
- $\gamma_b$  : Coefficient permettant de prendre en compte la présence éventuelle

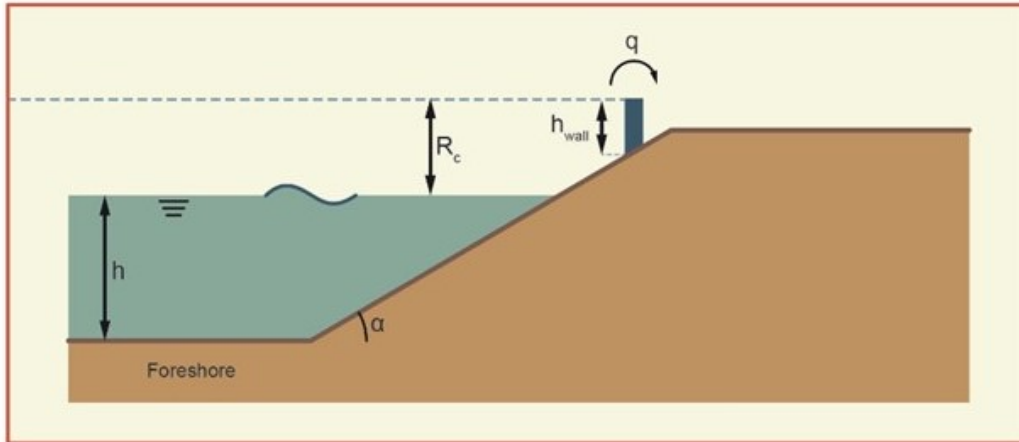


Figure 4: Configuration de digue avec mur sur la face exposée aux vagues

d'une berme horizontale sur la pente de la digue. En l'absence de berme sur la pente,  $\gamma_b = 1$

- $\gamma_f$  : Coefficient permettant de prendre en compte la rugosité de la face de la digue. Pour une pente enherbée,  $\gamma_f = 1,15H_{m0}^{1/2}$  si  $H_{m0} \leq 0,75$  et  $\gamma_f = 1$  sinon.
- $\gamma_\beta$ : Coefficient permettant de prendre en compte la direction de propagation des vagues.  $\gamma_\beta = 1 - 0,022|\beta|$  pour un angle d'incidence  $0^\circ \leq \beta \leq 80^\circ$ .
- $\gamma_v$  : Coefficient permettant de prendre en compte la présence d'un mur vertical sur la digue (Figure 4). Dans cette configuration géométrique,  $\gamma_v = \exp\left(-0,56\frac{h_{wall}}{R_c}\right)$ , pour  $0,08 \leq \frac{h_{wall}}{R_c} \leq 1$ . En l'absence de mur,  $\gamma_v = 1$ .

A partir de la connaissance du débit de surverse par unité de longueur de digue  $q$ , il est possible de déterminer le volume maximum qui se déverse par unité de largeur de digue durant l'événement de tempête  $V_{max} = qT_{temp}$  (en l/m), si  $T_{temp}$  (s) est la durée de la tempête.

## 2 Localisation de l'ouvrage et conditions météo-climatiques de projet

Dans ce projet, il s'agit d'étudier la surverse provoquée par les vagues sur une digue située à Sankt-Peter Ording sur le littoral allemand de la Mer du Nord (Figure 5).



Figure 5: Localisation géographique de Sankt-Peter Olding

Cette digue est une digue en terre, recouverte d’herbe (Figure 6). Le pied de la digue est situé à une altitude que nous considérerons comme l’altitude zéro. La hauteur totale de la digue est de 4,38 m. La pente de la face de la digue située côté mer est constatée et vaut  $1/8$ .

La bathymétrie de la mer du nord au large de la digue est caractéristique d’un milieu sableux soumis à la marée et peut être approximée par une pente constante de 1%. Elle est invariante le long de la digue pour la portion de littoral étudiée.

Afin de déterminer la surverse provoquée par les vagues, on considère 4 scénarios météo-climatiques de projet qui correspondent à des tempêtes dont les temps de retour sont respectivement de 10, 20, 100 et 1000 ans. Dans chacun des scénarios, on a estimé, à partir des données météo-climatiques du site:

- la position de la surface moyenne du plan d’eau, qui sera considérée constante sur la zone d’étude. Cette position, comptée à partir de l’altitude de référence, prend en compte la surcôte provoquée par le vent.
- les conditions de vagues, à 1 km au droit de la digue, endroit où est mouillé un houlographe qui a permis de déterminer les caractéristiques des vagues.



Figure 6: La digue de Sankt-Peter Ording

Période retour (ans)	10	20	100	1000
Hauteur significative au houlographe $H_{large}$ (m)	1,16	1,36	1,68	2,02
Période des vagues $T$ (s)	4,5	4,5	4,5	4,5
Hauteur d'eau au droit de la digue $h$ (m)	1,7	2	2,5	3
Durée tempête $T_{temp}$ (s)	3600	3600	3600	3600

Table 1: Conditions météo-climatiques de projet

Les données relatives aux scénarios de projet sont données dans le Tableau 1.

Compte-tenu de la période de la houle et du fait qu'elle demeure identique pour chacune des conditions considérées, préciser si la digue est exposée à une mer du vent ou bien à de la houle. Analysez ensuite la localisation géographique du lieu étudié et expliquez le bien fondé de considérer ce type de vague.

### 3 Estimation des conditions de vagues au droit de la digue

En faisant l'hypothèse que la hauteur significative des vagues le long d'un profil perpendiculaire à la digue,  $H_m(x)$ , peut être estimée en modélisant la transformation d'une vague monochromatique de même période que la période caractéristique  $T$ , déterminer la hauteur significative de houle au droit de la digue, pour les quatre conditions météo-climatiques retenues (Tableau 1). On fera ici l'hypothèse additionnelle que la houle se propage vers la côte avec une incidence normale, c'est à dire perpendiculairement à la côte.

Vous expliquerez le principe du modèle que vous utilisez, en fournissant les programmes qui vous ont servi à déterminer la hauteur de houle.

En particulier:

- vous vérifierez dans chacun des cas si l'hypothèse de fond lentement variable est bien vérifiée en estimant la valeur du paramètre  $\mu(x)$ .

- vous vérifierez si la houle se propage sans déferler ou bien si elle déferle avant d'atteindre l'ouvrage. Dans ce cas, vous proposerez un modèle pour prendre en compte la dissipation due au déferlement dans la zone considérée.
- Dans la zone où la houle ne déferle pas, si vous utilisez le modèle linéaire, vous vérifierez sa validité en estimant la valeur de la cambrure des vagues  $\epsilon(x)$  durant leur propagation.

## 4 Estimation du débit de surverse due aux vagues

### 4.1 Lorsque les vagues sont en incidence normale

En vous appuyant sur la relation (1) et sur les résultats que vous venez d'établir, vous déterminerez le débit de surverse par unité de longueur d'ouvrage  $q$  (en l/s/m).

Vous estimerez préalablement le nombre d'Iribaren  $\xi$  et vous en déduirez la manière dont les vagues vont se comporter sur la face de la digue, côté mer.

Vous préciserez les valeurs des coefficients  $\gamma_b$ ,  $\gamma_f$ ,  $\gamma_\beta$ ,  $\gamma_v$  que vous retenez pour l'estimation en justifiant vos choix.

### 4.2 Lorsque les vagues ont une incidence $\beta$ de $60^\circ$ par rapport à la normale à la digue

En faisant l'hypothèse que la hauteur des vagues reste similaire à celle de l'incidence nulle (ce qui est compatible avec la bathymétrie invariante le long de la digue), vous estimerez à nouveau le débit de surverse  $q$  pour des vagues arrivant sur l'ouvrage avec une incidence  $\alpha$  de  $60^\circ$  par rapport à la normale à la digue.

Commentez le résultat.

## 5 Analyse de la sécurité de circulation sur le chemin situé au sommet de la digue

En vous appuyant sur les résultats obtenus pour la surverse dans chacun des scénarios retenus pour l'étude, vous analyserez les conditions de circulation sur le chemin situé au sommet de la digue en vous appuyant sur les recommandations européennes qui sont résumées sur le tableau présenté Figure 7.

Quelles préconisations formulerez-vous pour les autorités locales dans le cadre de la gestion préventive de l'événement ?

Hazard type and reason	Mean discharge $q$ (l/s per m)	Max volume $V_{max}$ (l per m)
People at structures with possible violent overtopping, mostly vertical structures	No access for any predicted overtopping	No access for any predicted overtopping
People at seawall / dike crest. Clear view of the sea.  $H_{m0} = 3$ m $H_{m0} = 2$ m $H_{m0} = 1$ m $H_{m0} < 0.5$ m	  0.3 1 10-20 No limit	  600 600 600 No limit
Cars on seawall / dike crest, or railway close behind crest  $H_{m0} = 3$ m $H_{m0} = 2$ m $H_{m0} = 1$ m	  <5 10-20 <75	  2000 2000 2000
Highways and roads, fast traffic	Close before debris in spray becomes dangerous	Close before debris in spray becomes dangerous

Figure 7: Critères de sécurité des personnes circulant sur l'ouvrages pendant les événements de tempête

## 6 Analyse de la sûreté de l'ouvrage

La surverse peut menacer l'intégrité physique de la digue. Des critères de résistance ont été établis expérimentalement afin de proposer des recommandations au niveau européen. Ces critères s'appuient sur la nature et l'état d'entretien de l'ouvrage, sur la hauteur significative des vagues incidentes, sur le débit de surverse  $q$  et sur le volume maximal de surverse pendant un événement  $V_{max}$  (Figure 8).

A partir de ces préconisations et des résultats que vous avez obtenus pour tous les scénarios météo-climatiques, vous analyserez les risques d'endommagement de la digue de Sankt-Peter Ording. L'estimation de l'état d'entretien de la digue pourra se faire par observation de la digue sur les images satellites fournies par Google Maps par exemple.

Dans l'hypothèse où la sûreté de la digue étudiée ne serait pas garantie pour l'ensemble des conditions étudiées, quelles préconisations de travaux à réaliser sur la digue proposeriez-vous aux autorités responsables de la protection contre les inondations à Sankt-Peter Ording?



Hazard type and reason	Mean discharge q (l/s per m)	Max volume V <sub>max</sub> (l per m)
Rubble mound breakwaters; H <sub>m0</sub> > 5 m; no damage	1	2,000-3,000
Rubble mound breakwaters; H <sub>m0</sub> > 5 m; rear side designed for wave overtopping	5-10	10,000-20,000
Grass covered crest and landward slope; maintained and closed grass cover; H <sub>m0</sub> = 1 – 3 m	5	2,000-3,000
Grass covered crest and landward slope; not maintained grass cover, open spots, moss, bare patches; H <sub>m0</sub> = 0.5 – 3 m	0.1	500
Grass covered crest and landward slope; H <sub>m0</sub> < 1 m	5-10	500
Grass covered crest and landward slope; H <sub>m0</sub> < 0.3 m	No limit	No limit

Figure 8: Critères de sûreté de l'ouvrage pendant les événements de tempêtes