

Détermination du niveau de protection des systèmes d'endiguement en milieu maritime

Determination of level of protection of coastal dike system

C. Trmal¹, Y. Deniaud², L. Cuvillier, P. Lebreton

¹ Cerema Méditerranée, Aix-en-Provence, celine.trmal@cerema.fr

² Cerema Eau, Mer et Fleuve, Brest, yann.deniaud@cerema.fr

Résumé

Les systèmes d'endiguement en milieu maritime, particulièrement lorsqu'ils sont en première ligne à la côte, sont soumis aux actions conjuguées de la houle, des niveaux marins et du vent. Ces actions hydrauliques sollicitant les ouvrages sont complexes car corrélées entre elles, notamment lorsque les fonds de l'avant-côte en amont de l'ouvrage sont faibles vis-à-vis des houles incidentes.

Dans le cadre réglementaire de la réalisation des études de dangers (EDD) maritimes, la définition du niveau de protection d'un système d'endiguement s'appuie à la fois sur la détermination des sollicitations marines auxquels ce dernier est confronté, mais également sur celle des franchissements admissibles, c'est-à-dire les premières entrées d'eau intermittentes que le système est en capacité de gérer sans mise en danger des ouvrages et des populations protégées.

Le raisonnement classique des études hydrauliques pour l'élaboration des plans de prévention des risques consiste à propager des actions hydrauliques d'une certaine probabilité conjointe d'occurrence, du large vers la côte, pour ensuite déterminer les franchissements générés. Or la mise en œuvre de cette approche pour la définition de niveau de protection conduit à multiplier les calculs pour tenir compte des nombreuses configurations de houles et de niveaux marins observés au large et susceptibles de produire le même effet à la côte. L'objet de la publication est donc de discuter d'une démarche de détermination du niveau de protection d'un système d'endiguement maritime qui inverse ce raisonnement et s'intéresse d'abord à la valeur des franchissements admissibles par le système, avant de relier celle-ci aux principales actions hydrauliques à l'origine du franchissement : la houle et le niveau marin, en pied d'ouvrage, mais aussi au large.

Mots-Clés

Étude de dangers, système d'endiguement, littoral, franchissement par paquets de mer, niveau de protection.

Abstract

Coastal defence systems are exposed to the combined actions of waves, sea levels and winds, particularly when they are on the front line at the coast. These hydraulic actions are complex because they are correlated, especially when the foreshore at the structure is shallow compared to the height of incident waves.

In the French regulation framework for carrying out risk analysis on defence systems, the definition of the level of protection is based on the determination of both marine actions and the tolerable overtopping, i.e. the first intermittent water inflows that the system can sustain without endangering the structure nor people in the protected area.

The usual process of hydraulic studies for risk prevention plans is to propagate hydraulic actions of a certain joint occurrence probability, from offshore to the coast, and then to determine the overtopping generated. However, the utilization of this approach to the definition of protection level leads to the multiplication of calculations to take into account the collection of configurations in which waves and sea levels are combined to produce similar effect at the coast. The purpose of the publication is therefore to discuss a process of determining the level of protection of a coastal defence system that reverses this reasoning i.e. which first identifies the value of the tolerable overtopping by the system, then links it to the main hydraulic actions at the origin of the overtopping: waves and sea level, at the toe of the structure, but also offshore.

Key Words

Risk studies, dike system, coastal, overtopping, level of protection.

Introduction

Pour mettre en place, définir les performances et gérer au quotidien un système d'endiguement ayant une vocation de défense contre les submersions, la réglementation impose la réalisation d'une étude de dangers (décret n° 2015-526 du 12 mai 2015). Cette étude se place au centre de la connaissance du système d'endiguement et de son environnement. Elle doit présenter et justifier le fonctionnement et les performances attendues du système d'endiguement en toutes circonstances, à partir d'une démarche d'analyse de risque s'appuyant sur la collecte, l'organisation, l'étude et la confrontation de toutes les informations et données pertinentes. Les contenus détaillés attendus de cette étude ont été fixés par l'arrêté du 7 avril 2017 précisant le plan de l'étude de dangers des digues organisées en système d'endiguement et des autres ouvrages conçus ou aménagés en vue de prévenir les inondations et les submersions.

La finalité d'un système d'endiguement est la protection d'un territoire, appelé « zone protégée », contre les inondations provenant d'un cours d'eau endigué ou de la mer, et cela jusqu'à un certain niveau d'événement, appelé « niveau de protection » (article R. 214-119-1 du code de l'environnement). Ce niveau de protection est défini comme la hauteur maximale, établie par le gestionnaire, que peut atteindre l'eau sans que la zone protégée soit inondée en raison du débordement, du contournement, ou de la rupture des ouvrages de protection quand l'inondation provient directement du cours d'eau ou de la mer. La réglementation demande que ce niveau soit apprécié au regard, soit d'un débit du cours d'eau en crue ou d'une cote de niveau atteinte par celui-ci, soit d'un niveau marin pour le risque de submersion marine. Dans ce dernier contexte, il est aussi admis que le système d'endiguement puisse accepter des venues d'eau en quantités limitées dans la mesure où celles-ci ne sont pas préjudiciables à la tenue des ouvrages et à la sécurité des populations.

Dans un premier temps, cette publication rappelle l'origine et la complexité des sollicitations hydrauliques en domaine maritime et leurs relations avec le niveau de protection. Dans un second temps elle présente et discute une approche méthodologique alternative de détermination du niveau de protection, s'appuyant sur la détermination de la valeur des franchissements et des débits associés, admissibles par un système d'endiguement maritime soumis à une attaque frontale de la houle.

Phénomènes naturels, sollicitations et niveau de protection en domaine maritime

Niveau de protection et sollicitations hydrauliques sur les ouvrages maritimes

La caractérisation du niveau de protection et de la zone protégée par un système d'endiguement maritime dépend de l'analyse de deux éléments :

- la capacité du système à gérer les flux d'eau et venues d'eau dangereuses en l'absence de défaillance du système d'endiguement.

Cette capacité peut s'apprécier par une quantification des débits maximums franchissant les limites du système endigué sans provoquer de désordres aux ouvrages ou de mise en danger dans la zone endiguée où sera définie la zone protégée.

- la résistance des ouvrages aux sollicitations hydrodynamiques.

Les ouvrages du système d'endiguement doivent être en mesure de résister aux effets des franchissements, de la poussée statique et de la cyclicité du niveau d'eau, ainsi que des chocs induits par les vagues.

Ces deux éléments sont classiquement appréhendés à partir des deux variables du milieu marin que sont le niveau marin au repos et les états de mer, considérés soit en pied d'ouvrage, soit au large (Figure 1).

Au large, à quelques dizaines de kilomètres de la côte, le niveau d'eau est influencé par les conditions atmosphériques (surcote barométrique) et les conditions de marée, tandis que les états de mers dépendent du vent et la houle océanique résiduelle. À la côte, à quelques centaines de mètres du rivage, les courants de marées et les courants générés par le vent provoquent des afflux d'eau influençant le niveau d'eau en pied des ouvrages. La transformation des houles à la côte (diffraction, réfraction, shoaling, déferlement et réflexion), notamment sous l'effet de la bathymétrie, influence les niveaux d'eau et modifie les caractéristiques de l'agitation (vagues) en pied d'ouvrage.

Si les caractéristiques au large sont accessibles à la mesure et à l'analyse statistique à partir de données de marégraphes ou de houlographes, les données précises à la côte sont plus difficiles à établir compte tenu de la complexité, de l'interdépendance et de la spécificité de chaque site au regard des conditions et processus qui s'y produisent (évolution morphodynamique, nature, type et géométrie des ouvrages et de l'environnement).

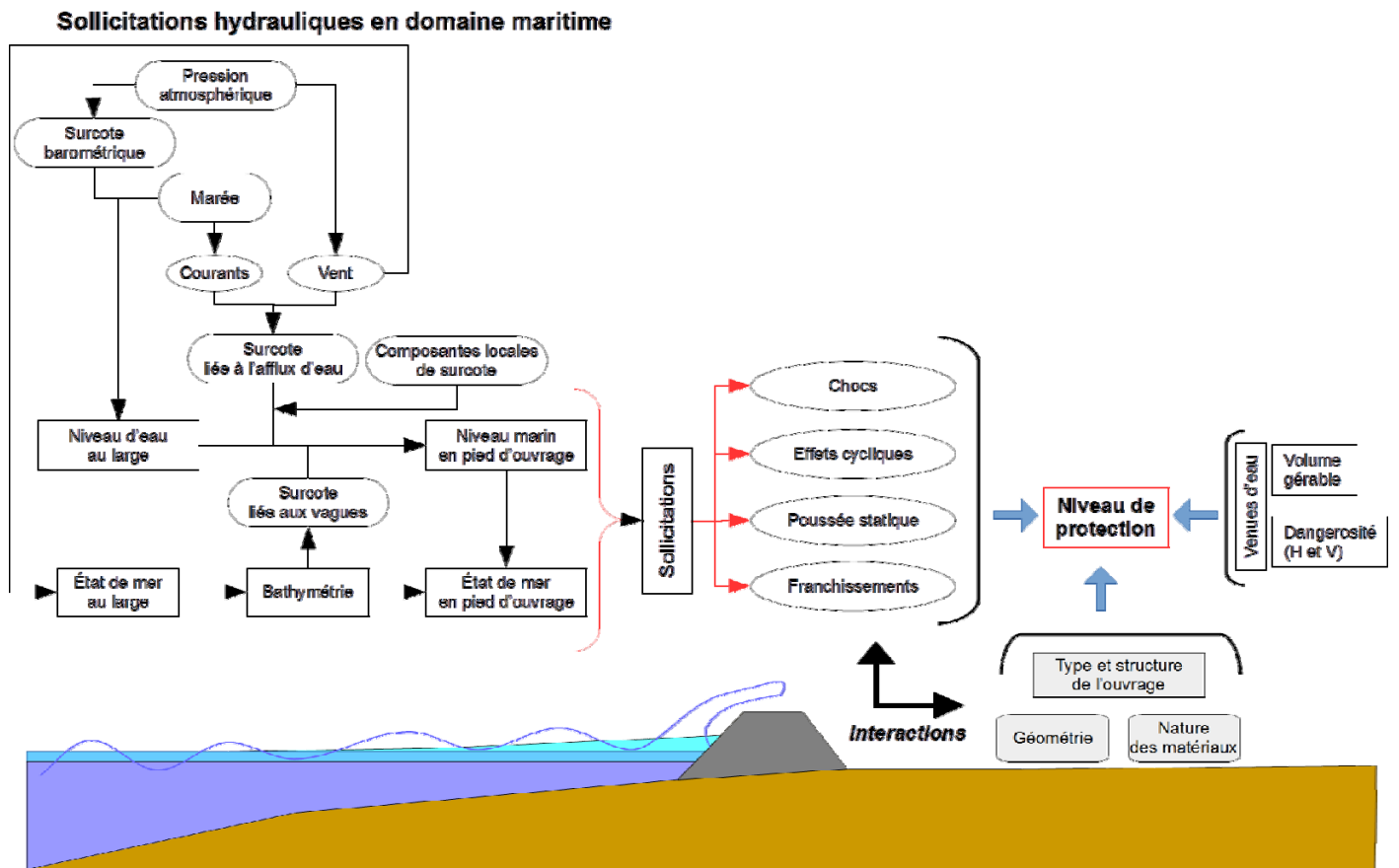


FIGURE 1 : SCHEMA DESCRIPTIF DES SOLLICITATIONS HYDRAULIQUES SUR LES OUVRAGES EN ENVIRONNEMENT MARITIME

Finalement, la définition du niveau de protection d'un système d'endiguement maritime suppose d'établir des relations entre les conditions d'agitation et de niveau marin au large et les conditions d'agitation et de niveau à la côte compte tenu des conditions de site (principalement la bathymétrie côtière, la géométrie, la nature et l'état de l'ouvrage) et les débits susceptibles de franchir les limites du système et d'affecter la zone endiguée.

Méthodologie habituelle des études hydrauliques maritimes

Les sollicitations et franchissements en domaine maritime sont habituellement évalués à partir de la connaissance des états de mer et des niveaux d'eau au large. Ces actions hydrauliques évaluées en termes de probabilités conjointes sont alors propagées à la côte pour évaluer leurs caractéristiques au droit des ouvrages côtiers. La mise en œuvre de cette approche découle des méthodes de dimensionnement des ouvrages côtiers ou de la réalisation des études pour les plans de prévention des risques littoraux (PPRL), pour lesquels un événement naturel caractéristique est défini en amont pour évaluer la résistance des ouvrages (dimensionnement) ou ses conséquences sur le territoire [1,2].

Dans le cadre de la caractérisation d'un niveau de performance, a priori non connu, tel que peut l'être le niveau de protection, cette démarche conduit à multiplier les calculs pour tenir compte des nombreuses configurations de houles et de niveaux au large, lesquels produisent cependant souvent un effet similaire à la côte.

Une nouvelle approche spécifique pour la détermination d'un niveau de protection en maritime

Pour un endiguement maritime, les premières entrées d'eau subies par le système, se produisent en général par franchissements de paquets de mer au-dessus d'un ou plusieurs tronçons, sauf en cas de présence de brèches ou d'ouvrages traversants. La détermination des franchissements admissibles, c'est-à-dire les entrées d'eau intermittentes que le système est en capacité de gérer sans mise en danger des ouvrages et des populations protégées dépend de la capacité de résistance des ouvrages, de leur configuration géométrique et du ressuyage possible des écoulements à terre par le système. Généralement, la capacité de résistance des ouvrages est bien supérieure au débit de franchissement admissible par le système, conduisant à des inondations dangereuses ou ingérables. L'analyse hydraulique de ce débit constitue ainsi une valeur seuil de référence pour la

détermination du niveau de protection.

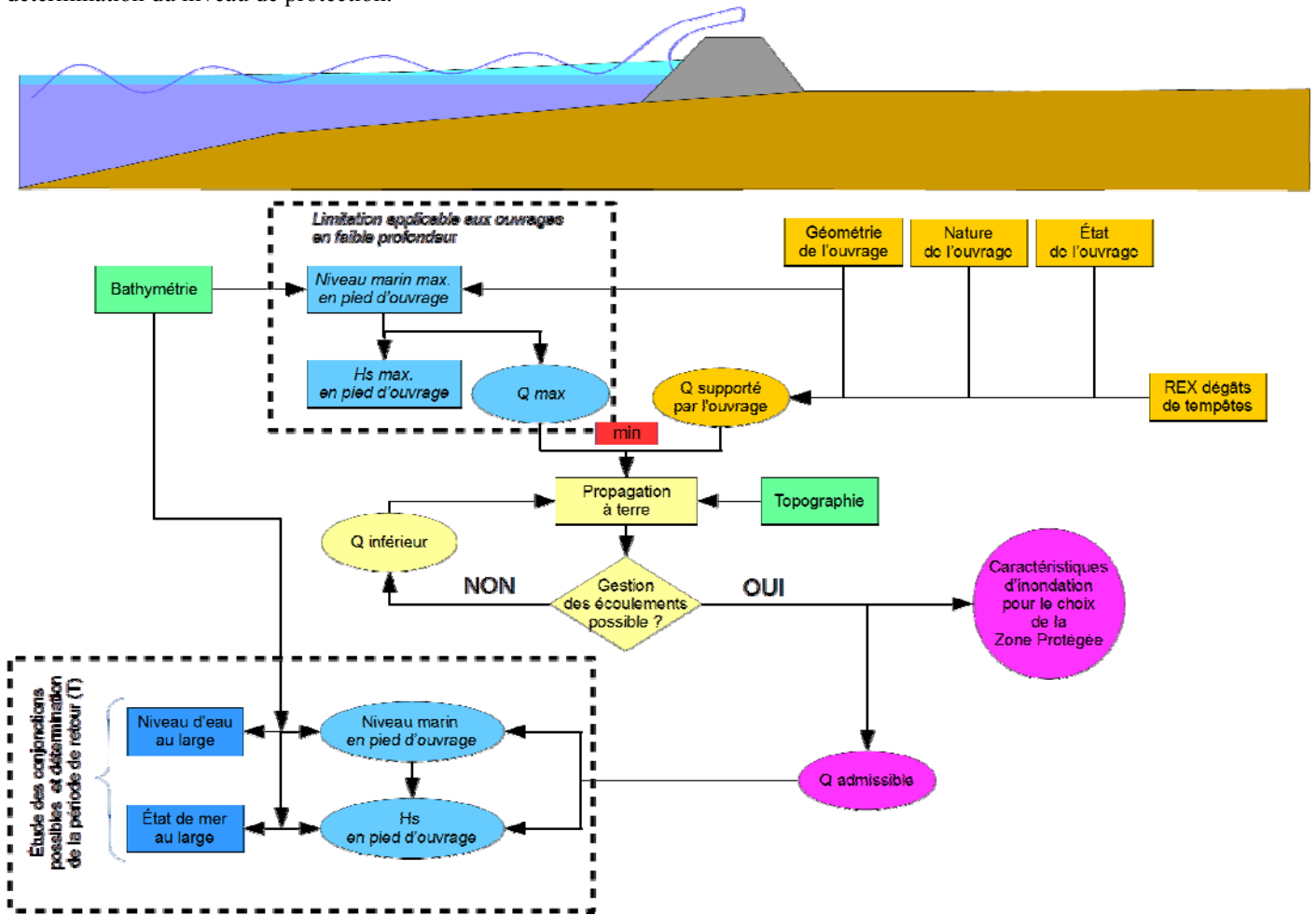


FIGURE 2 : SCHEMA GENERAL DE LA METHODOLOGIE

Dans le cas des ouvrages implantés en grande profondeur d'eau, la relation entre les caractéristiques hydrodynamiques en pied d'ouvrage et au large seront peu ou faiblement influencées par la bathymétrie. Dans le cas des ouvrages implantés en faible profondeur d'eau, la bathymétrie jouant un rôle prépondérant dans la propagation et la déformation des conditions d'agitation, la bathymétrie et la géométrie de l'ouvrage permettent de borner la valeur du débit de franchissement (Q_{max} de la Figure 2).

Analyse des différentes étapes proposées pour la détermination du niveau de protection

La démarche proposée s'appuie sur trois étapes qui sont analysées dans les paragraphes suivants :

- la définition des franchissements admissibles ;
- la détermination des niveaux d'eau et caractéristiques de vagues en pied d'ouvrage

produisant le débit admissible ;

- le rattachement avec les caractéristiques hydrodynamiques au large.

La définition des franchissements admissibles

Comme cela a été exposé aux paragraphes précédents, les franchissements admissibles vont dépendre de :

- la capacité du système à gérer les flux d'eau et venues d'eau dangereuses en l'absence de défaillance du système d'endiguement.
- la résistance des ouvrages aux sollicitations hydrodynamiques.

Ces franchissements admissibles se traduisent très souvent en termes de débits moyens admissibles, considérés au paroxysme de l'événement marin. Le débit est dit « moyen » car il est moyenné sur un ensemble de vagues. Les débits moyens admissibles de la littérature peuvent paraître faibles,

cependant, d'une part, le volume franchi par une vague est moyenné par la période de la houle et d'autre part toutes les vagues ne franchissent pas, ce qui conduit à des débits instantanés bien supérieurs aux débits moyennés.

Dans l'Eurotop II [3] plusieurs valeurs admissibles sont préconisées notamment pour la tenue des ouvrages aux sollicitations hydrodynamiques (voir l'exemple du Tableau 1). L'ordre de grandeur de ces valeurs est à considérer. Les retours d'expérience des tempêtes passés permettent de consolider le choix du débit admissible.

Le choix du débit admissible est aussi et surtout dicté par la capacité du système à gérer les flux d'eau et les venues d'eau dangereuses. Dans ce cas une étude topographique de la zone en arrière du système et une analyse de l'écoulement et de l'évacuation des rentrées d'eau de mer permettront de consolider le choix. La durée de l'événement est à intégrer à la réflexion. La somme des volumes franchis sur l'événement et l'intensité des pics permettront d'évaluer l'adéquation avec la gestion hydraulique du système.

TABLEAU 1 : DEBITS FRANCHISSANT ADMISSIBLES A CONSIDERER DANS LA CONCEPTION DES DIGUES, LEVES, FRONTS DE MER

Type de talus	Conditions	Débit moyen (l/s/ml)
Talus avant en enrochement	$H_{m0} > 5$ m Pas de dommage	1
	$H_{m0} > 5$ m Talus arrière conçu pour des franchissements par paquets de mer	5 à 10
Crête et talus arrière enherbés	$H_{m0} = 1$ à 3 m Couverture enherbée dense et entretenue	5
	$H_{m0} = 0,5$ à 3 m Couverture enherbée non entretenue, mousse, morceaux à nu	0.1
	$H_{m0} < 1$ m	5 à 10
	$H_{m0} < 0,3$ m	Pas de limite

La détermination des niveaux d'eau et caractéristiques de vagues en pied d'ouvrage produisant le débit admissible

La détermination des franchissements par paquets de mer par-dessus des digues se réalise dans la majorité des cas à l'aide de formules empiriques qui permettent de calculer un débit ou un volume franchi à partir des conditions hydrauliques en pied d'ouvrage et la configuration de l'ouvrage (pente et rugosité du talus avant, présence d'un mur chasse-mer...).

À l'heure actuelle, le guide Eurotop II [3] constitue le meilleur état de l'art des formules empiriques de franchissement, adaptées pour un large panel de géométries

d'ouvrage et de conditions hydrauliques. Il a été mis à jour en 2016. Le guide Enrochement [4] et le guide International Levee Handbook [5] se sont appuyés sur la version précédente de ce guide.

La grande majorité des formules de calcul du débit prennent la forme générique donnée à l'Équation 1. Elle lie directement la houle incidente au débit franchissant. Le niveau marin intervient dans la formule par le biais de la revanche, différence verticale entre la crête de l'ouvrage et le niveau marin au repos (c'est-à-dire sans prise en compte de la présence des vagues). Elles ont été élaborées à partir d'essais en canal à houle sur modèle réduit.

$$q / \sqrt{gH_{m0}^3} = a \exp\left(-b \left(\frac{R_c}{H_{m0}}\right)^c\right) \quad (1)$$

où :

q = débit franchissant ($m^3/s/ml$)

H_{m0} = hauteur significative de la houle (m)

R_c = revanche de la digue (m)

a et b = coefficients dépendant de la pente du talus de l'ouvrage, de la rugosité de ce talus, de l'angle d'incidence de la houle, de la période de la houle.

c = constante.

Les limites de ces formules sont nombreuses. Notamment, elles ne prennent pas en compte l'ensemble des configurations d'ouvrages. Elles sont contraintes par les incertitudes qui relèvent de la modélisation à échelle réduite. Elles ne prennent pas en compte l'effet du vent. Les franchissements les plus faibles sont les franchissements les plus incertains.

D'autres outils sont envisageables. La modélisation physique est la plus employée dans le cas de géométries d'ouvrages complexes, d'ouvrages de plus grande envergure comme les protections portuaires ou d'ouvrages à vocation industrielle. Elle peut être envisagée dans le cas d'enjeux forts dans la zone protégée.

La modélisation numérique des franchissements commence à faire ses preuves. Elle consiste à modéliser numériquement un canal à houle en utilisant des méthodes VOF (Volume of fluid) [6], elle reste cependant très consommatrice en temps de calcul.

Dans le cadre des études de danger, le débit admissible est une entrée. Il peut être produit par plusieurs couples niveau marin / hauteur de houle. Les formules de la forme de l'Équation 1 lient justement la hauteur significative de la houle H_{m0} au niveau marin, tous deux en pied d'ouvrage. La Figure 3 montre un exemple d'application de la formule 5.12 de l'Eurotop II [3] sur un cas réel dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Période de la houle $T_{m-1,0}$: 10.75 s
- Cote de la crête : 7,9 m NGF
- Talus de pente uniforme et approximative de 4/1 en enrochement
- Cote du fond devant l'ouvrage : 2 m NGF.

et dont le débit admissible est limité à 10 l/s/ml par la configuration de la zone protégée et la résistance de la digue.

La courbe rouge délimite deux domaines. Les couples niveau marin / hauteur de houle en pied d'ouvrage situés sous la courbe rouge donneront des débits inférieurs à 10 l/s/ml et les couples au-dessus de la courbe des débits supérieurs.

La configuration des lieux, notamment en cas de faible profondeur d'eau devant l'ouvrage permet de réduire l'étendue des couples possibles en pied d'ouvrage. La hauteur de la houle est dans ce cas fortement dépendante de la profondeur d'eau, qui elle-même varie en fonction du niveau marin et de la bathymétrie du fond marin au droit de l'ouvrage.

Sur un fond marin plat, le critère de déferlement, définit comme la hauteur de la houle limite sur la hauteur d'eau, est de 0.78 selon la théorie développée par McCowan (1891) [7]. Sur un fond en pente uniforme, Goda (2000) [8] a proposé des abaques pour la détermination de ce critère en fonction de la période de la houle et de la pente des fonds. Ces abaques sont également repris dans l'Eurotop II [3]. Le critère de déferlement, définit par le rapport de la hauteur significative de la houle (H_{m0}) sur la profondeur d'eau (h), est compris entre 0.4 et 1.2.

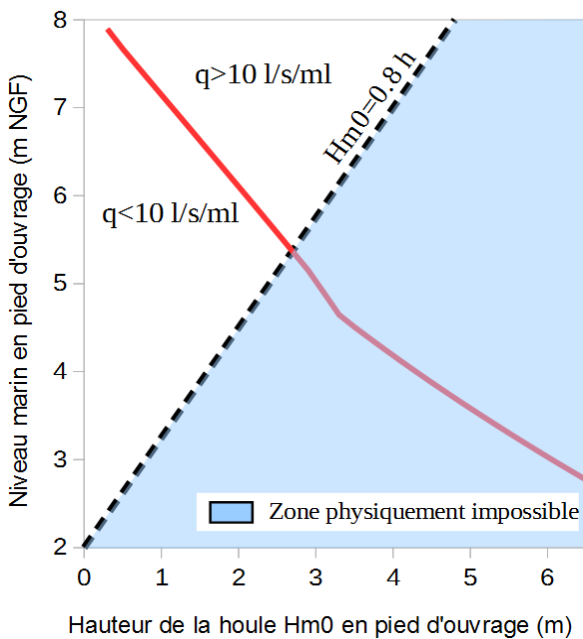


FIGURE 3 : EXEMPLE D'UNE COURBE NIVEAU/HOULE EN PIED D'OUVRAGE POUR UN DEBIT ADMISSIBLE DE 10 L/S/ML OBTENUE SUR LE CAS REEL PRESENTE

Globalement, des fonds peu pentus donnent des valeurs faibles du critère de déferlement et donc le déferlement écrête une grande partie des houles. Les houles courtes (de faibles

périodes) sont les houles qui subissent le plus de déferlement (critère de déferlement faible). Par contre le déferlement est limité en cas de houles longues (critère de déferlement fort).

À la Figure 3 une valeur du critère de déferlement de 0.8 est retenue pour compléter le graphique. Cette valeur peut être affinée par les modélisations numériques de propagation des houles comme expliqué à la section suivante.

Dans le cas de la modélisation physique ou numérique des franchissements, le raisonnement « inverse » est lourd à mettre en œuvre car nécessite de réaliser un très grand nombre de modélisations avec des conditions en entrée très variées pour ainsi reconstituer l'abaque présenté en Figure 3.

Le rattachement avec les caractéristiques hydrodynamiques au large

Une fois déterminées les conditions hydrauliques au pied de l'ouvrage pouvant produire le débit admissible, il est d'un grand intérêt d'exprimer ces conditions en fonction des conditions au large.

Le terme générique « au large » désigne le lieu de connaissances des conditions hydrauliques. Pour la houle, il est localisé en général à quelques kilomètres des côtes, soit au niveau de bouées houlographiques (lieux de mesure) soit au niveau de points de sorties de modélisations numériques à grande échelle. Pour les niveaux marins, il est situé dans les ports dans le cas de mesures ou à quelques kilomètres des côtes dans le cas de détermination par modélisations numériques à grande échelle.

Dans certains cas de configurations de côtes simples (côte rectiligne, houle frontale...) et de profondeur d'eau faible, il est possible d'avoir un raisonnement simplifié, qui est développé ci-dessous pour la compréhension de la méthode.

Comme cela a été expliqué à la section précédente, le critère de déferlement divise deux situations. Dans le premier cas, le critère de déferlement n'est pas dépassé. La hauteur de la houle à l'ouvrage est fonction de la hauteur de la houle du large, ce qui est illustré par la partie gauche des Figures 4 et 5. Dans le cas où le déferlement se produit avant le pied de l'ouvrage, la hauteur de houle à l'ouvrage est dépendante de la profondeur d'eau. Autrement dit, quelle que soit la hauteur de houle au large, la même hauteur de houle sera présente en pied d'ouvrage, partie droite des Figures 4 et 5.

Cependant comme précisé dans la section précédente, le critère de déferlement et le niveau marin ont un rôle non négligeable dans l'intensité de la hauteur de houle en pied d'ouvrage. Pour illustrer ces faits, deux graphiques ont été construits.

Le premier, la Figure 4, illustre l'influence de la valeur du critère de déferlement. Si le déferlement de la houle a lieu avant la digue, dans le cas d'un critère de déferlement de 0.4, un niveau marin au large supérieur à 6,23 m NGF donnera

des débits franchissant supérieurs à 10 l/s/ml. Pour un critère de déferlement de 1.2, dès un niveau marin au large supérieur à 4,62 m NGF les débits franchissant seront supérieurs à 10 l/s/ml.

Le deuxième, la Figure 5, montre les conséquences d'un approfondissement des fonds jusqu'à 2 m. Pour ce calcul, le critère de déferlement est fixé à 0,8. En cas de déferlement et si les fonds ne varient pas, un niveau marin au large supérieur à 5,25 m NGF donnera des débits supérieurs à 10 l/s/ml. En cas d'approfondissement de 2 m, dès un niveau marin de 4,38 m NGF, les débits franchissant seront supérieurs à 10 l/s/ml.

Dans le cas présent un approfondissement de 2 m a des conséquences supérieures en termes de dépassement des débits franchissant que le critère de déferlement. Ceci est d'autant plus problématique que le critère de déferlement est borné alors que l'approfondissement devant la digue ne l'est pas, sauf en cas de présence d'un platier rocheux. Sur des estrans sableux, il n'est pas rare de constater des évolutions verticales supérieures à 2 m, par exemple devant le perré de Wissant [9].

L'analyse ci-dessus est réalisée suivant un profil de digue et une direction de houle, il convient d'itérer cette méthode sur l'ensemble des profils du système de protection pour tenir compte à la fois des points bas mais aussi de l'exposition à la houle des différentes sections.

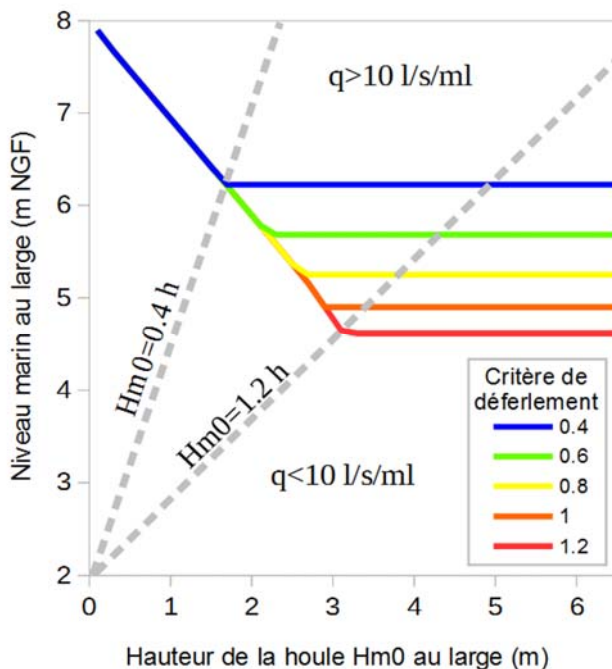


FIGURE 4 : EXEMPLE DE COURBES NIVEAU/HOULE AU LARGE POUR UN DEBIT ADMISSIBLE DE 10 L/S/ML EN FONCTION DU CRITERE DE DEFERLEMENT OBTENUES SUR LE CAS REEL PRESENTE

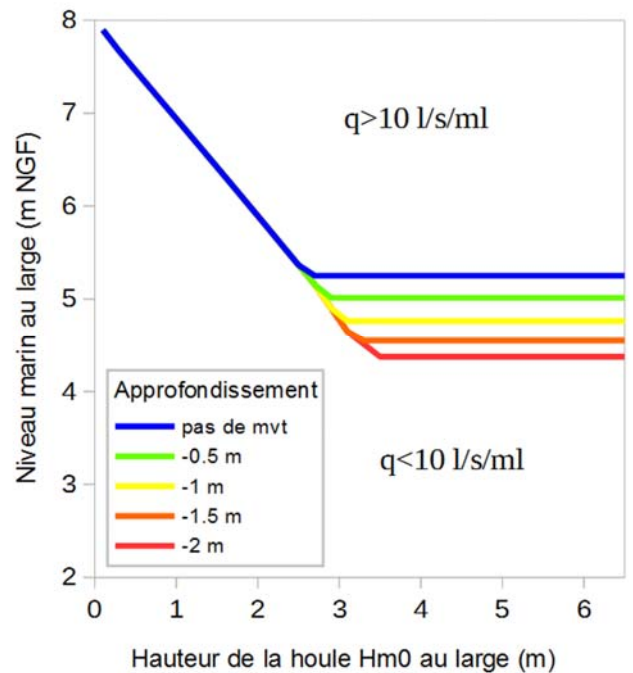


FIGURE 5 : EXEMPLE DE COURBES NIVEAU/HOULE AU LARGE POUR UN DEBIT ADMISSIBLE DE 10 L/S/ML EN FONCTION D'UN APPROFONDISSEMENT DES FONDS DEVANT L'OUVRAGE OBTENUE SUR LE CAS REEL PRESENTE

La méthode présentée ici est simplifiée, la hauteur de la houle à l'ouvrage est identique à la hauteur de la houle au large dans le cas de non-déferlement de la houle (partie gauche des courbes) et la hauteur de la houle à l'ouvrage est issue du critère de déferlement dans le cas de déferlement de la houle (partie droite des courbes). En réalité des fonctions de transfert entre les conditions de houle du large et les conditions à l'ouvrage sont à élaborer. Dans la grande majorité des cas elles sont élaborées par de la modélisation d'un grand nombre de cas pour reconstituer des abaques du type de celui de la Figure 4. Ces modélisations permettent d'affiner la relation entre la hauteur de la houle au large et la hauteur de la houle à l'ouvrage en cas de non déferlement (partie gauche de la courbe) et d'ajuster le critère de déferlement (partie droite de la courbe), en fonction de la configuration des lieux. Cependant un des points faibles de la modélisation numérique est le calcul de la houle déferlante. Bien souvent le déferlement est intégré par le biais de formulation empirique. De plus au niveau de la ligne de déferlement, les fonds marins sont plus pentus, moins uniformes et évolutifs à toutes les échelles de temps particulièrement dans les environnements sableux (par exemple du fait de la présence de barres d'avant-côte).

L'exemple simplifié développé ici montre qu'une attention particulière est à donner à l'étude des mouvements bathymétriques devant la digue, en cas de déferlement avant la digue, car ces évolutions peuvent avoir des conséquences plus importantes que l'affinement de la modélisation

numérique de la propagation de la houle.

À partir de ce type d'abaque définissant l'ensemble des couples niveau marin / houle il est possible de déterminer le niveau de protection apparent.

Si la houle ne déferle pas avant la digue (partie gauche des abaques), le niveau de protection apparent est défini par des couples niveau marin et houle. En cas de déferlement (partie droite des abaques), le niveau de protection apparent peut se résumer à un unique niveau d'eau.

Dans une grande majorité des sites, c'est la partie droite des abaques qui va être d'un grand intérêt pour la définition du niveau de protection apparent. Dans de nombreux cas, les niveaux marins les plus forts vont se produire en tempête et à ce moment-là les houles au large sont également fortes. Dans le cas réel exposé dans le présent article, des houles de hauteurs significatives approximativement de 2 à 3 m au large déferlent avant l'ouvrage. Dans ce cas le niveau de protection apparent peut être défini par un niveau marin au large.

Conclusion

Les systèmes d'endiguement situés en première ligne sur le littoral sont soumis à des actions marines, notamment les états de mer et les niveaux marins, qui interagissent aux abords de la côte, ce qui complexifie fortement la caractérisation d'un niveau de protection au sens réglementaire des études de danger.

Dans de nombreux cas, les premières venues d'eau dans le système se font par franchissement de paquets de mer. La caractérisation du niveau de protection nécessite de définir en premier lieu les franchissements admissibles pour la zone endiguée et pour la tenue de l'ouvrage. Ensuite, par une méthode simplifiée il est démontré qu'il est possible de remonter aux conditions hydrauliques en pied d'ouvrage et de les rattacher à des points de référence (pour la houle, au large, dizaines de kilomètres de la côte et pour les niveaux marins, aux lieux de mesures, souvent situés dans des ports).

Lorsque l'ouvrage se situe devant un estran peu profond, ce qui est une configuration courante, les vagues déferlent avant d'atteindre l'endiguement, il est possible de simplifier la caractérisation du niveau de protection par un niveau marin.

Dans ce cas, la mise en œuvre de la méthode simplifiée exposée dans cet article prend tout son sens dans la mesure où il est démontré que l'influence des évolutions bathymétriques de l'estran devant l'ouvrage est plus importante que le choix du modèle de déferlement de la houle. Alors que la propagation de la houle et le déferlement de celle-ci peuvent être affinés par les dernières technologies de modélisations numériques, les abaissements des estrans sont une réalité à impérativement considérer bien qu'elle soit encore difficile à appréhender.

Remerciements

Les auteurs remercient les membres du groupe de travail national sur les ouvrages littoraux qui comprend les services de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques des DREAL littorales, l'IRSTEA, le BETCGB et le CEREMA pour leur contribution aux réflexions et travaux présentés dans cet article.

Références

- [1] DGPR (2014). Guide méthodologique : Plan de prévention des risques littoraux. Ministère de l'Écologie, du Développement durable, et de l'Énergie
- [2] CEREMA (2015). *Analyse Du Fonctionnement Hydro-Sédimentaire Du Littoral - Cahier Technique*. CEREMA
- [3] EurOtop (2016). Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B. www.overtopping-manual.com
- [4] CIRIA, CUR and CETMEF (2009). *Guide Enrochement*. CIRIA-CUR-CETMEF
- [5] CIRIA, French Ministry of Ecology and USACE (2013). *The International Levee Handbook*. CIRIA
- [6] Mokrani, C, Abadie, S and Lubin, P (2014). Simulation numérique du phénomène de franchissement d'ouvrage par une houle irrégulière. *XIIIèmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*. Paralia CFL, Dunkerque. 10
- [7] McCowan, J (1891). On the solitary wave. *Philosophical Magazine*. **36** 430–7
- [8] Goda, Y (2000). *Random Seas and Design of Maritime Structures (2nd Edition)*. World Scientific, Singapore
- [9] DDTM 59 (2017). Observatoire du trait de côte. http://carto.geo-ide.application.developpement-durable.gouv.fr/162/TRAIT_DE_COTE.map