

Méthodologie de calcul de la hauteur des vagues dues au vent et du run-up associé sur des grands linéaires d'endigements

Maxime DARBOT¹, Vincent FUCHS¹, Sébastien CORBET¹

1. Compagnie Nationale du Rhône, Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques, 4 rue de Chalon sur Saône, 69007 Lyon, France.

M.DARBOT@cnr.tm.fr

Résumé :

Dans le cadre de l'Arrêté du 6 août 2018 fixant les prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages, la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) doit vérifier la conformité de ses ouvrages classés à diverses exigences de sûreté. L'une de ces exigences est la conformité de la revanche face aux vagues soulevées par le vent selon plusieurs configurations combinant des conditions d'exploitation et des situations de vent : un vent de période de retour 50 ans soufflant sur une retenue qui se trouve à la cote des PHE (Plus Hautes Eaux) et un vent de période de retour 1 000 ans soufflant sur la retenue normale (RN).

Dans le cadre de cette démarche, CNR, responsable d'un linéaire important d'endigements le long du Rhône (près de 400 km) a eu besoin de mettre au point des méthodes homogènes de justification de la conformité de ses ouvrages. Pour cela, un benchmark a permis de déterminer la méthodologie et les formules les plus appropriées pour cette justification sur un grand linéaire.

La méthode consiste à déterminer la longueur du fetch (longueur du plan d'eau sur laquelle souffle le vent et génère des vagues) à partir d'un outil développé sur système d'information géographique (SIG), puis de calculer les caractéristiques des vagues (hauteur, période, déferlement, ...) pour enfin calculer le run-up et estimer la revanche nécessaire vis-à-vis des vagues engendrées par le vent. Cette méthodologie est appliquée sur tout le linéaire d'endiguement de la vallée du Rhône et permet de mettre en évidence les secteurs où les vagues sont susceptibles de franchir la crête des ouvrages.

Mots-clés :

Ouvrages hydrauliques, Revanche, Vitesse du vent, Run-up, Fetch.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

1. Introduction et contexte

L'arrêté du 6 août 2018 (MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE, 2018) fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages (dit Arrêté Technique Barrage ou ATB) présente dans son annexe 1, les prescriptions techniques applicables à tous les barrages des classes A et B.

Le chapitre VI de cette annexe aborde les prescriptions diverses à prendre en considération, dont la revanche des ouvrages hydrauliques face aux vagues soulevées par le vent (item 27) : « Pour déterminer la revanche, qui représente la différence de cote entre la retenue et la crête de l'ouvrage éventuellement surmontée d'un dispositif de mitigation (parapet, pare-vagues, merlon), on considère la plus défavorable des deux configurations suivantes :

- a) Un vent de période de retour 50 ans soufflant sur une retenue à la cote des PHE.
- b) Un vent de période de retour 1 000 ans soufflant sur une retenue à la cote de retenue normale RN. »

Selon la note d'interprétation de l'ATB, « La revanche est destinée à éviter le franchissement des vagues dues à l'effet du vent par-dessus la crête, et l'érosion externe des appuis aval ou de certains barrages sensibles (remblais). »

La conformité à cette prescription de l'ATB est acquise s'il n'y a pas de franchissement par-dessus les ouvrages ou si ces franchissements sont sans impact sur leur stabilité.

Au regard de ces éléments, CNR, responsable d'un linéaire important d'endiguements (barrages latéraux dans le sens de la réglementation) le long du Rhône (près de 400 km) a mis en œuvre une méthodologie afin d'expliquer comment prendre en compte les calculs de revanche des ouvrages hydrauliques face aux vagues soulevées par le vent et d'analyser la conformité de ces ouvrages à cette prescription de l'ATB.

2. Méthodologie de justification

Le Centre d'Analyse Comportementale des Ouvrages Hydrauliques (CACOH) de CNR a produit une méthodologie de calcul de la hauteur des vagues dues au vent et du run-up associé sur le Rhône. Cette méthodologie se déroule en plusieurs étapes présentées synthétiquement ci-après.

2.1 Détermination de la hauteur d'eau

La hauteur d'eau moyenne est calculée en retenant l'hypothèse simplificatrice que la section du Rhône correspond à une section trapézoïdale avec des pentes de talus amont de 3/1 (H/V), figure 1.

Les écoulements du Rhône sont modélisés à partir de modèle 1D issus de l'outil de modélisation hydraulique Fudaa-Crue. La hauteur d'eau moyenne est calculée à partir de la largeur au miroir et la section mouillée qui sont extraits de Fudaa-Crue pour chaque profil bathymétrique.

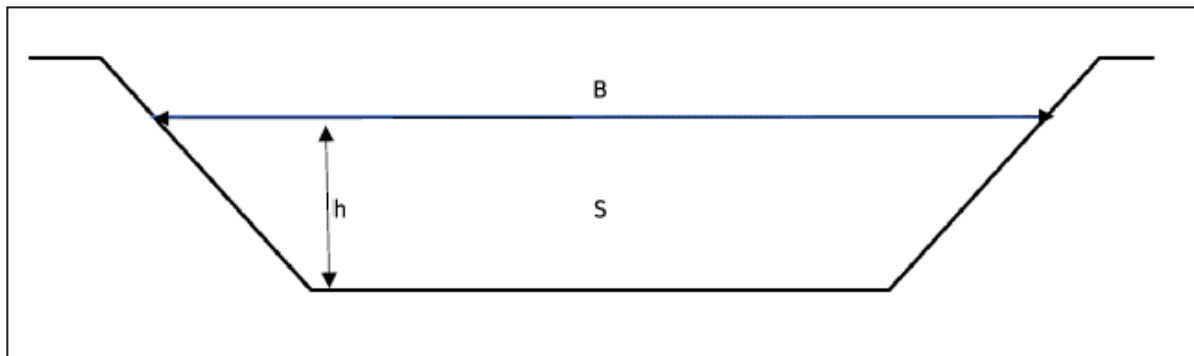


Figure 1. Schéma d'une section trapézoïdale hypothétique du Rhône.

En retenant l'hypothèse que la pente du talus amont est dressée à m/n (rapport longueur/hauteur), la détermination de la hauteur moyenne se fait alors après résolution de l'équation polynomiale du second degré suivante (1) :

$$\frac{m}{n}h^2 - Bh + S = 0 \quad (1)$$

où : h est la hauteur d'eau moyenne (m), B la largeur au miroir (m) et S la section mouillée (m²).

2.2 Détermination du fetch

Le fetch est la distance sur le plan d'eau sur laquelle souffle le vent (longueur rectiligne maximale d'une grande masse d'eau de surface qui est uniformément affectée dans la direction et la force du vent).

La génération de vagues dues au vent dans les retenues et les lacs est donc généralement limitée par la géométrie du plan d'eau. Pour les cours d'eau, le fetch concerne parfois un linéaire assez faible qui n'est pas toujours représentatif de la longueur du plan d'eau réellement exposé au vent. Dans ce cas, on utilise la notion de fetch effectif (BAW, 2005 ; figure 2) qui consiste à réaliser une moyenne pondérée des longueurs du plan d'eau autour du fetch, donné par l'équation (2).

Le fetch effectif est déterminé en traçant des lignes radiales à plus ou moins 45° de la direction du vent considérée à des intervalles de 5°.

$$F_{eff} = \frac{\sum(R(\alpha) \cdot \cos^2 \alpha)}{\sum \cos \alpha} \quad (2)$$

où : F_{eff} est le fetch effectif (m), $R(\alpha)$ est la longueur radiale pour un angle α (m) et α est l'angle entre la direction du vent considéré et $R(\alpha)$ (en degré).

Le calcul du fetch est automatisé sur ArcGIS par un programme développé par CNR. Ce programme permet de déterminer pour chaque rive des endiguements le fetch maximal.

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

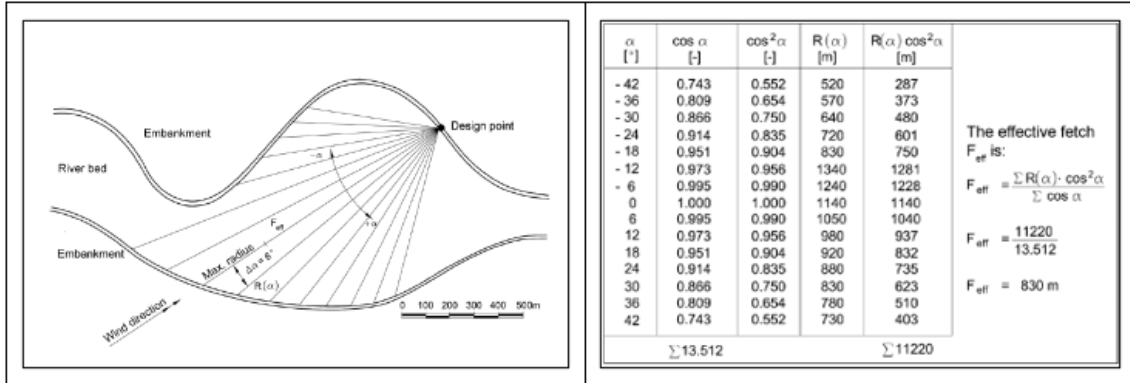


Figure 2. Illustration de la notion de fetch effectif (BAW, 2005).

2.3 Détermination de la vitesse du vent

La détermination de la vitesse moyenne du vent se fait à partir de la norme NF EN 1991-1-4 Actions du vent, qui fournit les vitesses moyennes sur 10 min (AFNOR, 2005).

Le vent doit souffler de manière continue pour soulever de manière significative des vagues. Les rafales brèves et violentes n'ont pas une durée suffisante pour générer des vagues. La hauteur des vagues maximale est atteinte pour une durée de temps minimale (3) dépendant du fetch (BAW, 2005). L'équation (4) donne la vitesse de vent de dimensionnement (USACE, 1984).

$$t_{min} = \frac{F_{eff}^{2/3}}{v_m^{0.41}} \quad (3)$$

$$v_{m-tmin} = v_m' \left(1.277 + 0.296 \cdot \tanh \left(0.9 \cdot \log \left(\frac{45}{t_{min}} \right) \right) \right) \quad (4)$$

où : t_{min} est le temps minimal pour soulever des vagues (s), v_m' la vitesse moyenne du vent ($m \cdot s^{-1}$) et v_{m-tmin} est la vitesse moyenne du vent sur une durée correspondant à t_{min} ($m \cdot s^{-1}$).

2.4 Détermination de la hauteur et de la période des vagues

Le CFBR préconise l'utilisation des formules de Smith à celles de Brettschneider dans le cas de vents supérieurs à 120 km/h (CFBR, 2015). Sur le Rhône, les vents sont toujours inférieurs à 120 km/h, la hauteur significative des vagues (H_s) et la période des vagues (T) sont données par les équations de Brettschneider (5) et (6) (BAW, 2005).

$$H_s = a_1 \cdot \frac{v_{m-tmin}^2}{g} \cdot \tanh \left[a_2 \cdot \left(\frac{gh}{v_{m-tmin}^2} \right)^{a_3} \right] \cdot \tanh \left[\frac{a_4 \cdot \left(\frac{gF_{eff}}{v_{m-tmin}^2} \right)^{a_5}}{\tanh \left[a_2 \cdot \left(\frac{gh}{v_{m-tmin}^2} \right)^{a_3} \right]} \right] \quad (5)$$

$$T = \alpha_1 \cdot \frac{v_{m-tmin}}{g} \cdot \tanh \left[\alpha_2 \cdot \left(\frac{gh}{v_{m-tmin}^2} \right)^{\alpha_3} \right] \cdot \tanh \left[\frac{\alpha_4 \cdot \left(\frac{gF_{eff}}{v_{m-tmin}^2} \right)^{\alpha_5}}{\tanh \left[\alpha_2 \cdot \left(\frac{gh}{v_{m-tmin}^2} \right)^{\alpha_3} \right]} \right] \quad (6)$$

où : H_s correspond à la hauteur significative des vagues (m), T la période des vagues (s), α_i correspondent aux paramètres de calage de l'équation de Brettschneider (voir tableau 1), h est la hauteur d'eau moyenne (m), g l'accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$), v_{m-tmin} la vitesse du vent dimensionnante ($m.s^{-1}$) et F_{eff} le fetch effectif (m).

Tableau 1. Valeurs des paramètres de calage de l'équation de Brettschneider (BAW, 2005).

Paramètres	$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	$\alpha 4$	$\alpha 5$
H_s	0.283	0.530	0.750	0.0125	0.420
T	7.540	0.833	0.375	0.077	0.250

2.5 Calcul du run-up maximal

L'attaque des vagues sur la berge correspond à leur déferlement sur le plan incliné du talus. Le déferlement dépasse le niveau du plan d'eau permanent et constitue le niveau maximum appelé run-up.

Le paramètre de run-up pour des vagues irrégulières le plus communément utilisé pour les ouvrages en terre est $R_{u2\%}$, c'est-à-dire que 2% des vagues dépassent ce niveau de run-up. La formule de Hunt est utilisée pour calculer $R_{u2\%}$ (7) (AIPCN, 1987).

$$R_{u2\%} = H_s \cdot C_n \sqrt{2\pi} \cdot \xi \quad (7)$$

où : H_s est la hauteur des vagues considérées (m), C_n une constante de probabilité de dépassement (égale à 0.7 pour la houle) et ξ le nombre d'Iribaren (paramètre de déferlement).

Le run-up est alors calculé par l'équation (8) (AIPCN, 1987).

$$R_u = R_{u2\%} \cdot r_r \cdot r_b \cdot r_\beta \quad (8)$$

où : R_u correspond à la hauteur de déferlement (m), r_r un facteur de réduction dû à la rugosité du talus, r_b un facteur de réduction dû à la présence d'une risberme (égale à 1 pour les endiguements du Rhône) et r_β un facteur de réduction dû à l'attaque oblique des vagues.

2.5.1 Détermination du facteur de réduction lié à la rugosité de la protection

Le coefficient de rugosité dépend de la nature de la protection du talus et peut-être déduit du tableau 2 suivant :

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

Tableau 2. Coefficient de rugosité en fonction du type de protection (AIPCN, 1987).

<i>Nature de la protection</i>	<i>Coefficient de rugosité (r_r)</i>
<i>Bitume, béton lisse</i>	<i>1.00</i>
<i>Blocs de béton, matelas de géotextile, béton bitumineux à structure ouverte, matelas végétaux</i>	<i>0.95</i>
<i>Perré</i>	<i>0.90</i>
<i>Matelas de blocs préfabriqués rugueux et perméables, enrochements appareillés</i>	<i>0.80</i>
<i>Graviers, matelas de gabions</i>	<i>0.70</i>
<i>Enrochements</i>	<i>0.60</i>

2.5.2 Détermination du facteur de réduction liée à l'incidence oblique de la houle

Lorsque les vagues ont une incidence oblique sur le talus, un facteur de réduction peut être déterminé par l'équation (9) (CIRIA, CUR, CETMEF, 2009).

$$r_\beta = 1 - 0.0022|\beta| \text{ pour } 0^\circ \leq |\beta| \leq 80^\circ \quad (9)$$

où : β correspond à l'angle formé entre le sens de propagation de la vague et la perpendiculaire à la berge (en degré). Pour $\beta > 80^\circ$, Le calcul est effectué avec $\beta = 80^\circ$.

2.6 Définitions de la cote de crête des ouvrages hydrauliques

La définition de la cote de crête de endiguements correspond au point le plus haut de l'ouvrage, voir figure 3. Selon le type de digue, cette crête est :

- a) La cote du sommet du cavalier quand la digue dispose d'un cavalier ;
- b) La cote maximale de la piste de crête de digue le cas échéant.

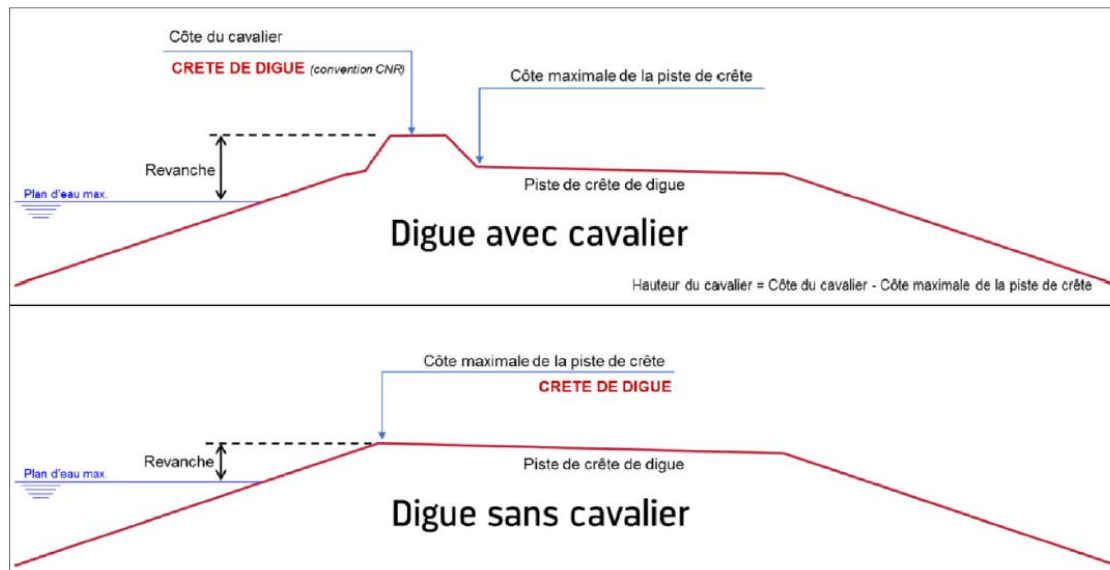


Figure 3. Description de la notion de crête de digue.

3. Conclusion

CNR a mené un benchmark afin de déterminer la méthode la plus adaptée pour calculer la revanche de ses ouvrages hydrauliques face aux vagues soulevées par le vent et d'analyser la conformité de ces ouvrages à cette prescription à l'ATB.

Les résultats appliqués sur les aménagements de CNR correspondent à la différence en mètre entre la crête des ouvrages et la revanche nécessaire vis-à-vis du vent pour les deux situations de projet tous les 100 m.

La méthodologie permet également à CNR de dimensionner de nouvelles protections en enrochements (notamment étendue de la protection et blocométrie à mettre en place) mais également d'évaluer l'état des protections dans le cadre de leurs diagnostics (DARBOT *et al.*, 2020).

4. Références bibliographiques

AFNOR (2005). *Eurocode 1 : actions sur les structures - Partie 1-4 : actions générales - actions du vent*, NF EN 1991-1-4, 124p.

AIPCN (1987). *Recommandations pour le dimensionnement et la construction de revêtements souples incorporant des géotextiles pour les voies navigables intérieures*. Rapport du groupe de travail n°4 du Comité Technique Permanent. Bruxelles.

BAW - Bundesanstalt für Wasserbau- (2005). *Principles for the design of bank and bottom protection for inland waterways*. GBB, Allemagne, 200p.

CFBR (2015). *Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages et des digues en remblai*. France, 134p. ISBN 979-10-96371-01-3

CIRIA, CUR, CETMEF (2009). *Guide enrochement. L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques*. 1302p., Editeur CEREMA, ISBN 978-2-11-098518-7

Thème 4 – Ouvrages portuaires, offshore et de plaisance

DARBOT M., DUMAS M., FUCHS V. (2020). *Evaluation des protections en enrochements : inspection visuelle et diagnostic*. XVIème Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil, pp. 443-450, Le Havre. doi:10.5150/jngcgc.2020.050

MINISTERE DE LA TRANSITION ECOLOGIQUE ET SOLIDAIRE (2018). *Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages*, JORF n°0198 du 29 août 2018, <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/arrete/2018/8/6/TREP1800557A/jo/texte>

USACE (1984). *Shore Protection Manual*. Coastal Engineering Research Center-CERC, Department of the Army, Waterways Experiment Station-WES, Corps of Engineers, PC Box 631, Vicksburg, Mississippi 39180, USA, 652p.