

PRISE EN COMPTE DES TRAVAUX RECENTS DANS L'ÉVALUATION DE LA REVANCHE POUR LES BARRAGES EN REMBLAIS

Taking into account recent research in dam wind freeboard evaluation

Thomas VIARD, Maud GRADELET

EDF-CIH, 4 allée du lac de Tignes 73290 La Motte Servolex
thomas.viard@edf.fr ; maud.gradelet@edf.fr

MOTS CLEFS

Revanche, vent, vague, fetch

KEY WORDS

Freeboard, wind, wave

RÉSUMÉ

L'arrêté du 6 août 2018 couramment appelé arrêté technique barrage ou ATB demande d'étudier la revanche disponible pour un ouvrage pour deux situations de vent : un vent millénal soufflant sur une retenue à cote normale (RN) et un vent cinquantennal pendant la crue de projet.

Ces situations d'étude étaient déjà proposées dans les recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages du CFBR en 2013. Il est à noter que pour les barrages rigides ces recommandations estimaient qu'une revanche nulle à la crue de projet pouvait être acceptable, ce qui n'est pas explicite avec l'ATB. L'annexe 2 de ces recommandations propose aussi une méthode pour calculer la revanche qui s'inspire de formules qui ont parfois plusieurs dizaines d'années.

Cet article propose une méthode de calcul de revanche basée sur des références bibliographiques plus récentes (Eurocode, Guide Enrochement et EurOtop) et conforme à l'état de l'art et propose de s'affranchir du coefficient « K » appliqué au milieu de la chaîne de calcul (entre la hauteur de vague et le run-up) pour se focaliser sur une estimation du risque cohérente avec les standards actuels notamment utilisés pour les digues marines. En effet, l'évaluation de la sûreté basée des digues maritimes se focalise sur les volumes et débits de surverse dues aux vagues avec un retour d'expérience solide qui pourrait judicieusement contribuer à l'amélioration de la démonstration de sûreté pour les barrages.

ABSTRACT

Decree from 2018 August the 6th usually called dam technical decree or ATB in French impose to study available freeboard for dams in two situations. First in case of 1000 years return period wind blowing on a reservoir at normal level. Then in case of 50 years return period wind blowing on a reservoir at level reached for safety flood.

These two situations were already recommended to study in sizing dam spillway book edited by CFBR in 2013. It is notable that this book estimated for rigid dams no freeboard could be acceptable, which is not clear with ATB. An annex of those recommendations gave a method to estimate freeboard based on old formula.

This article presents a new method to evaluate freeboard based on recent bibliography (Eurocode, Rock Manual and EurOtop) at state of the art. This method prefers to avoid using "K coefficient" which was applied between different formula (between wave height and wave run-up). It focuses now on a risk estimation conform to what is done for jetty and littoral levees. For these kind of structure, state of the art evaluate safety focusing

on volume and discharge of waves overflow based on experience feedback that could be useful to improve dam safety demonstration.

1. CONTEXTE

L'arrêté du 6 août 2018 [1] couramment appelé arrêté technique barrage ou ATB inscrit dans la réglementation une pratique courante recommandée par le CFBR [2] concernant le risque de vagues générées par un vent soufflant sur une retenue. L'item 27 du chapitre VI de l'annexe 1 indique :

« Pour la détermination de la revanche, qui représente la différence de cote entre la retenue et la crête du barrage éventuellement surmontée d'un dispositif de mitigation (parapet, pare-vagues, merlon), on considère la plus défavorable des deux configurations suivantes :

- *un vent de période de retour de 50 ans soufflant sur une retenue à la cote des PHE;*
- *un vent de période de retour de 1 000 ans soufflant sur une retenue à la cote de retenue normale RN. »*

La cote des PHE est la cote atteinte pour la crue de projet du barrage définie dans ce même arrêté. La note d'interprétation précise cet item notamment de la manière suivante :

« Il existe plusieurs méthodes de calcul. Les recommandations CFBR sur les évacuateurs de crue (2013) et sur la justification des remblais (2015) décrivent la méthode de Smith (1991) ; le guide CFGB sur les petits barrages (2002) cite plutôt la formule de Bretschneider. Ces méthodes font intervenir les caractéristiques du vent (vitesse, direction le cas échéant), de la retenue (longueur du fetch, c'est-à-dire de la surface continue sur laquelle le vent souffle), et du barrage (pente et type de revêtement du parement amont). A noter que ces méthodes incluent un dépassement de la crête par un pourcentage accepté de vagues, en fonction du type de barrage ».

Il est à noter que le pourcentage de vagues acceptable n'est pas explicite, même s'il dépend du type du barrage. Les recommandations CFBR sur les évacuateurs de crue [2] fournissent des pourcentages acceptables mais indiquent aussi qu'une « revanche nulle », c'est-à-dire 100 % des vagues qui passent par-dessus la crête peut être acceptable pour les barrages rigides (béton ou maçonnés). Aujourd'hui, conformément à ces recommandations, EDF estime systématiquement qu'une revanche nulle pour les barrages rigides est acceptable si aucun problème de stabilité ou d'érosion en pied d'ouvrage n'est identifié. Le présent article se focalise donc plus sur les barrages en remblais pour lesquels le franchissement des vagues sur la crête peut entraîner une érosion des matériaux constitutifs du barrage. Pour ces ouvrages il est recherché la justification d'une revanche non nulle et une démonstration de sûreté détaillée est systématiquement réalisée. Néanmoins la méthodologie présentée ici pourrait s'appliquer à tout type de barrage.

L'ancienne méthode utilisée par EDF et présentée au paragraphe suivant utilisait de nombreuses sources bibliographiques plutôt anciennes et pas toujours cohérentes entre elles. EDF a donc fait le choix de mettre à jour sa méthodologie en s'appuyant sur la bibliographie récente, normative et de référence au niveau européen :

- L'Eurocode [3] pour l'estimation du vent ;
- Le Guide Enrochement [4] pour les caractéristiques des vagues ou de la modélisation numérique ;
- L'EurOtop [5] pour le calcul du run-up

Cette nouvelle méthode a l'avantage d'être conforme à l'état de l'art, cohérente et de permettre d'améliorer la démonstration de sûreté.

2. PRECEDENTE METHODE UTILISEE A EDF

2.1. L'ancienne méthode : évaluation du vent, des vagues et run-up

L'ancienne et la nouvelle méthode suivent les 3 mêmes étapes globales communes à la majorité des calculs de revanche :

1. Evaluation du vent ;
2. Evaluation des vagues ;
3. Evaluation du run-up (déferlement des vagues sur le parement du barrage).

Evaluation du vent :

Cette première étape diffère peu entre l'ancienne et la nouvelle méthode. L'ancienne méthode se basait sur l'Eurocode 1 pour la valeur locale de vent de temps de retour de 50 ans sur 10 minutes à 10 mètres du sol. Des formules sont ensuite appliquées selon les étapes suivantes :

- Ajustement de la période de retour ;
- Ajustement de l'altitude (si besoin) ;
- Ajustement de la durée de vent ;
- Ajustement du passage terre-eau.

Les formules utilisées venaient de l'Eurocode 1, ROSA 200 [6] et du Coastal Engineering Manual (CEM) [7] pour réaliser ces ajustements.

Evaluation des vagues :

Une fois la vitesse du vent calculée, le fetch, distance de plan d'eau sur laquelle souffle le vent pour générer les vagues doit être calculé. Deux méthodes pouvaient être utilisées :

- Mesure du fetch maximal ;
- Calcul d'un fetch effectif selon la méthode de Saville décrite dans [4] pour les retenues étroites (Figure 1) :

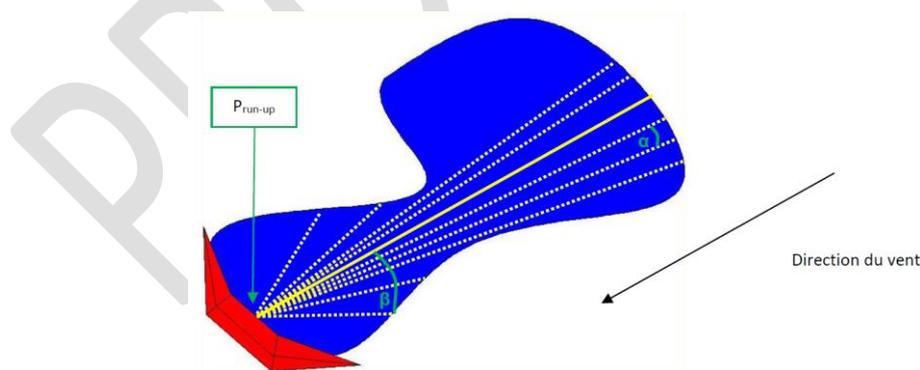


Figure 1 : Calcul du fetch effectif selon Saville

Les formules de Wilson et Goda [4] ou Sverdrup-Munj-Bretschneider répertoriées dans [4] étaient utilisées en fonction de si les conditions de « pleine mer » étaient atteintes ou non pour évaluer la hauteur significative h_s des vagues correspondant à la hauteur moyenne du tiers supérieur des vagues.

Evaluation du run-up :

Avant de calculer le run-up ou déferlement des vagues sur le parement amont, un coefficient k , associé à une fréquence de dépassement des vagues était appliqué à la hauteur significative des vagues, conformément aux recommandations CFBR pour définir une hauteur de dimensionnement dépendant du type d'ouvrage :

- $K = 0.75$ pour les barrages en béton ;
- $K = 1.00$ pour les barrages en enrochements ;
- $K = 1.20$ pour les barrages en remblais avec une route en crête et $K = 1.30$ pour les barrages en remblais enherbés en léger écart aux recommandations CFBR qui retient $K = 1.25$ dans les deux cas.

Une fois ce coefficient appliqué, une hauteur de run-up dépassée par 2% des vagues était calculée à partir de la formule du Taw2002a [4] pour les barrages en remblais et pour les barrages béton, la hauteur significative modifiée du coefficient k était conservée en l'état.

2.2.L'ancienne méthode et ses limites

Il a été décidé d'actualiser la méthodologie car l'ancienne comportait un certain nombre de limites.

Pour l'évaluation des vitesses de vent, elle mélangeait les formules de l'Eurocode 1, ROSA 2000 et du Coastal Engineering Manual (CEM) pour chercher un maximum à partir de référentiels pas toujours cohérents entre eux et présentant des domaines d'application légèrement différents. Cette démarche peut amener à un excès de conservatisme. Il est en effet à noter que l'Eurocode 1 est déjà une norme intégrant dans sa méthodologie globale un certain nombre de conservatismes pour couvrir les incertitudes inhérentes à toute méthode. De plus l'intégralité de la méthode Eurocode 1 n'était pas appliquée, les effets locaux (direction du vent, surélévation éventuelle de la retenue, saisonnalité...) n'étaient pas pris en compte.

Pour le calcul des hauteurs de vagues, la méthode du fetch effectif a été critiquée dans la littérature [8]. En effet, les travaux de Seymour en 1977 et de Kahma et Pettersson en 1994 mettent en évidence que l'hypothèse supposant un poids identique pour chaque fetch dans le calcul du fetch effectif ne permet pas de retrouver le fetch effectif réel calculé à partir du spectre énergétique des vagues en cas de géométrie irrégulière. De plus rien ne garantit que ce fetch effectif soit a minima conservatif, un risque de sous-évaluation du risque existe donc avec cette méthode. A l'inverse conserver le fetch maximal pour une retenue étroite peut s'avérer trop conservatif, notamment pour les rivières canalisées comme le Rhin ou les canaux.

Concernant l'application du coefficient k , il a été calculé en supposant que la distribution des vagues suit une distribution de Rayleigh pour ne conserver qu'un certain pourcentage de vagues : environ 5 % des vagues pour les barrages en remblais, 13 % pour les barrages en enrochements et 32 % pour les barrages en béton. Toutefois, cette démarche est imparfaite. En effet, la formule de run-up est calculée après l'application du coefficient k , or ces formules de run-up sont établies empiriquement pour passer de la hauteur significative des vagues dépassée par 13 % des vagues à une hauteur de run-up dépassée par 2 % des vagues. Sachant que la distribution des hauteurs de run-up suit aussi une distribution de Rayleigh, il aurait été judicieux, a minima d'appliquer ce coefficient k sur les hauteurs de déferlement. Toutes les valeurs de k devraient également être inférieures à 1 afin de retrouver les valeurs de 5, 13 et 32 % puisque le run-up calculé n'est déjà dépassé que par 2 % des vagues. Par exemple il faudrait

appliquer un coefficient $k' = 0.72$ sur le run-up pour retrouver 13 % de dépassement de vagues et $k' = 0.52$ pour 32%. Passer de 13 % des hauteurs à 2 % des run-up entre 2 distributions de Rayleigh différentes n'étant pas triviale (très forte non-linéarité, il suffit de voir la formule du Taw2002a). Les pourcentages de dépassement de la hauteur de revanche obtenus avec les recommandations du CFBR sont en réalité assez éloignés des pourcentages initialement recherchés et très inférieurs à ces valeurs, ce qui représente un excès de conservatisme notable.

Pour le calcul du déferlement pour les barrages béton, le choix de conserver la hauteur de vague en eau profonde fait abstraction de la réflexion de la vague sur un parement vertical et sous-estime d'un facteur proche de 2 la hauteur réelle de run-up, ce qui n'est pas cohérent avec le pourcentage objectif de vagues franchissant, visé pour les barrages rigides.

Pour le calcul du déferlement pour les barrages en remblais, la formule retenue dans l'ancienne méthodologie est valide pour les parements étanches en pente douce, mais cela n'est pas représentatif de certains barrages en remblais présents dans le parc EDF.

On observe ainsi dans l'ancienne méthode quelques éléments qui ne vont pas dans le sens de la sûreté comme l'utilisation de la méthode de Saville ou la non prise en compte de la réflexion de l'onde sur une structure verticale et d'autres qui à l'inverse engendrent un « excès » de sûreté (coefficient k et le cumul des points les plus sécuritaires des différentes sources bibliographiques pour le calcul du vent). Le choix de se focaliser sur le run-up plutôt que sur les débits et volumes de surverse peut s'avérer conservatif ou non en fonction du pourcentage de dépassement de vague acceptable, il ne traduit, en tous cas, pas la réalité du risque de rupture ni ne fournit d'information pour l'accessibilité de la crête de l'ouvrage. Ce qui fait qu'au final, on ne peut ni garantir une appréciation réelle du risque, ni garantir d'être conservatif, ce qui est préjudiciable pour l'étude de conformité et l'analyse de risque de l'EDD.

En cas d'incertitudes, il est normal d'aller dans le sens de la sûreté par prudence. Toutefois, si l'état de l'art a démontré que certains points sont très sécuritaires et propose des éléments plus précis améliorant l'évaluation du risque, il est préférable de les adopter. En effet aller « inutilement » dans le sens de la sûreté peut entraîner une surestimation du risque qui pourrait avoir des effets contreproductifs :

- Une non-conformité vis-à-vis de l'ATB mis en évidence au chapitre 5 d'une EDD par excès de conservatisme mais non réelle peut entraîner des travaux inutiles pouvant impacter le budget d'autres travaux pour améliorer la sûreté,
- Une analyse de risque arrivant à la conclusion que l'exploitant ne peut traverser la crête de l'ouvrage dans certaines circonstances alors qu'il peut en réalité entraver ses actions pour empêcher la survenue de certains événements redoutés centraux (ERC),
- Un calcul identifiant un risque de rupture non réel peut entraîner des ordres d'évacuation aval non justifiés. La littérature [9] a mis en évidence qu'une évacuation non justifiée entraîne une forte baisse du nombre de personnes évacuant la zone à l'alerte suivante.

Pour toutes ces raisons, il a semblé pertinent à EDF de renforcer son référentiel technique et de se mettre en conformité avec l'état de l'art européen, et notamment d'abandonner le coefficient k pour améliorer l'analyse de risque de l'EDD et la démonstration de conformité vis-à-vis de l'ATB fait lors d'une EDD.

3. LA NOUVELLE METHODE

3.1. Estimation des caractéristiques du vent

Comme évoqué précédemment, pour des raisons de cohérence et parce qu'un corpus normatif est conçu comme un ensemble ayant pour objectif de couvrir l'ensemble des cas de manière sécuritaire et exhaustif, le choix a été fait de déterminer les caractéristiques du vent à l'aide de l'Eurocode 1 et uniquement l'Eurocode 1.

La vitesse de vent de temps de retour de 50 ans moyennée sur 10 minutes à 10 m du sol est fournie par une carte (Figure 2).

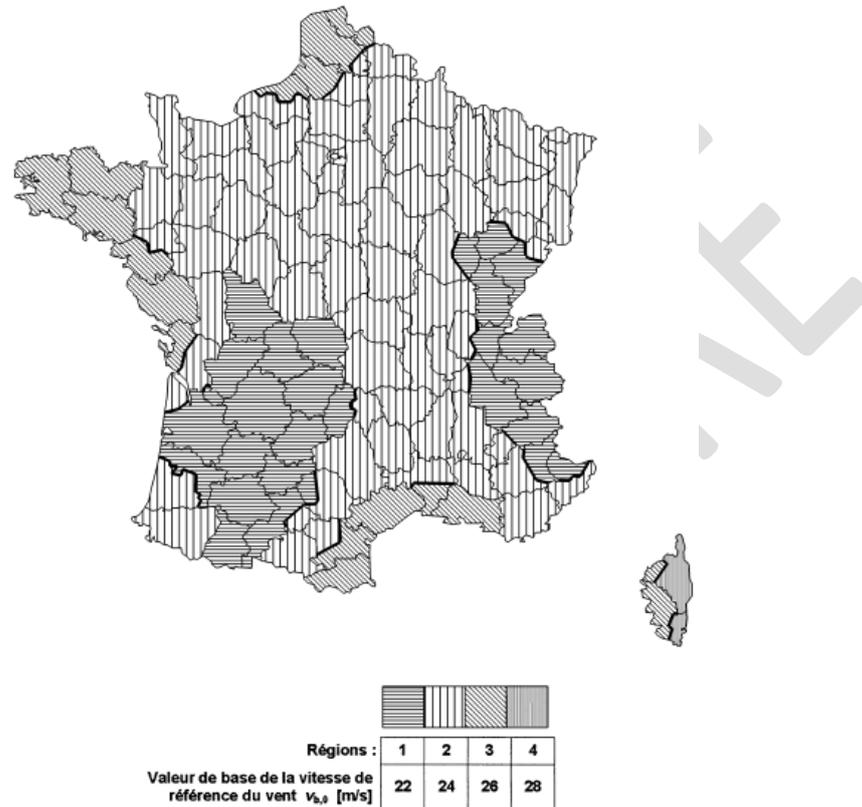


Figure 2 : Vitesses de vent en France

Pour obtenir le vent de temps de retour de 1 000 ans, selon la formule fournie par l'Eurocode 1, il suffit de multiplier par 1.16. Ces vitesses de vent sont ensuite adaptées localement à l'aide de 4 coefficients multiplicateur :

- Le coefficient de rugosité du terrain (Figure 3) ;
- Le coefficient d'orographie dépassant 1 pour les ouvrages dépassant du terrain (uniquement pour les canaux endigués ou des bassins en haut de falaise comme les stations de transfert d'énergie par pompage) ;
- La direction du vent ;
- La saisonnalité (uniquement en cas de gestion saisonnière de la retenue).

Type de terrain		Cr
0	Mer ou zone côtière exposée aux vents de mer ; lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance d'au moins 5 km	1.23
II	Rase campagne, avec ou non quelques obstacles isolés (arbres, bâtiments, etc.) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur	1.01
III.a	Campagne avec des haies; vignobles ; bocage ; habitat dispersé	0.82
III.b	Zone urbanisées ou industrielles ; bocage dense ; vergers	0.67
IV	Zones urbaines dont au moins 15 % de la surface sont recouverts de bâtiments dont la hauteur moyenne est supérieure à 15 m ; forêts	0.63 ¹

Figure 3 : influence de la rugosité du terrain

3.2. Estimation des hauteurs de vague

Pour le calcul des hauteurs de vague le cas général est peu différent de l'ancienne méthodologie. Le fetch est choisi avec un peu plus d'attention et le fetch maximal n'est pas systématiquement retenu. En effet, le run-up et les débits de franchissement sont influencés par l'angle d'incidence, le couple direction du fetch – angle d'incidence est choisi pour maximiser le run-up.

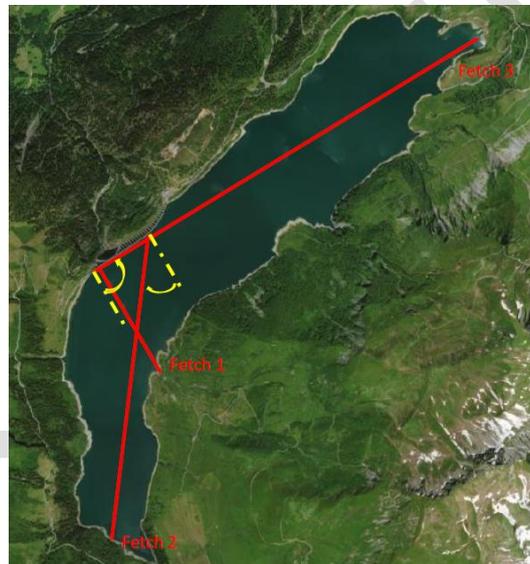


Figure 4 : exemples de couples fetch/angle d'incidence

Conformément au Guide Enrochement, la formule de Wilson et Goda est ensuite privilégiée, excepté si le fetch dépasse 10 km avec des retenues de plus de 1 km de large où dans ce cas, la formule de Sverdrup Munk Bretschneider est utilisée.

La méthode diffère de l'ancienne pour les cas particuliers. En effet, le recours à la modélisation numérique va être systématiquement privilégiée dans les cas suivants :

- Retenue de forme complexe ;
- Retenue étroite (rivière canalisée, barrages mobiles en rivière, canaux) ;
- Retenue peu profonde ;
- Retenue avec des vitesses d'écoulement élevées.

Pour résoudre ces cas, le logiciel TOMAWAC, modèle spectral de 3^{ème} génération de la suite TELEMAC-MASCARET, est privilégié. Dans le cas où les phénomènes de diffraction et de réflexion sur les ouvrages jouent un rôle prépondérant, un couplage avec le logiciel ARTEMIS de la même suite est réalisé pour obtenir une vision exhaustive du risque.

3.3. Estimation du run-up, des débits et volumes de surverse

Dans le domaine maritime, un travail européen très conséquent a été fait pour étudier le risque de run-up sur tout type / forme de parement : pente douce, pente forte ou vertical, lisse ou rugueux, imperméable ou non... Ces travaux ont été synthétisés dans l'EurOtop [5]. Ce travail a été réalisé dans un objectif de dimensionnement des systèmes marins de protection et concernent donc la sûreté et sont donc utiles pour une analyse de risque d'une EDD. Pour chaque formule empirique fournie, une formule de « dimensionnement » est aussi proposée où un écart type de la dispersion des valeurs ayant servi à caler la formule est ajouté pour être raisonnablement conservatif. C'est ainsi un guide récent (2018) et pratique pour le dimensionnement prenant bien en compte la sûreté. Le choix est donc fait par EDF de l'utiliser pour ses démonstrations de sûreté pour les run-up vis-à-vis de l'ATB et pour l'analyse de risque de l'EDD.

Ce guide, fondé aussi sur le retour d'expérience des défaillances de systèmes de protection marine, souligne que le pourcentage de vagues franchissant un ouvrage n'est pas un critère optimal pour évaluer un risque de défaillance. En effet, aujourd'hui les analyses de sûreté se focalisent plutôt sur les débits moyens de surverse et le volume maximal de la plus grosse vague qui passera par la crête au cours d'une tempête. Ces analyses se basant sur le retour d'expérience des érosions et ruptures de digues marines, leur prise en compte permet une meilleure évaluation du risque dans l'analyse de risque de l'EDD d'un barrage en remblais.

Dans un premier temps, le run-up dépassé par 2% des vagues est calculé (en fonction du parement amont : lisse ou rugueux, imperméable ou perméable, pente douce, forte ou verticale). Si la revanche disponible permet d'éviter un dépassement de plus de 2% des vagues, les débits et volume de surverse peuvent être considérés comme négligeables et ne sont pas calculés, l'ouvrage est supposé conforme aux exigences réglementaires et l'évènement initiateur « vagues engendrées par le vent » peut être écarté de l'analyse de risque.

Si plus de 2% des vagues dépassent la crête de l'ouvrage, l'ordre de grandeur de ce pourcentage est évalué à titre indicatif (2 à 13 % / 13 à 32 % / 32 à 50% / plus de 50 %) en supposant que les run-up suivent une distribution de Rayleigh et les débits et volumes de surverse sont calculés à partir des formules fournies par l'EurOtop [5] pour réaliser une analyse de sûreté (risque de rupture) et évaluer l'accessibilité de la crête et du pied de barrage en cas de tempête (au public – pour les conséquences aval – ou pour l'exploitant – pour un évènement initiateur d'accès à l'ouvrage).

3.4. Acceptabilité du risque

Les ouvrages maritimes sont généralement exposés à des conditions de tempêtes sévères et l'évaluation du franchissement est cruciale. De ce fait des efforts de recherche et d'ingénierie importants ont été mis en œuvre pour établir des guides de dimensionnement proposant des seuils de débits et de franchissements acceptables. En l'absence de REX consolidé sur les barrages en remblais, les valeurs de seuils proposées par le Guide Enrochement (Figure 5) et l'EurOtop (Figure 6) peuvent être utilisées comme ordres de grandeur et aide à l'évaluation du risque.

Ainsi pour EDF, la démonstration de sûreté pour un barrage en remblais est effectuée en 3 étapes :

- Si le run-up 2% ne dépasse pas la crête, la sûreté est considérée démontrée ;
- Sinon, si les valeurs de débits de franchissement (et de volume) sont inférieures aux valeurs de références pour les digues marines, la sûreté est démontrée ;
- Sinon, une analyse géotechnique plus poussée peut être envisagée pour valoriser la connaissance approfondie de nos ouvrages pour évaluer sa sensibilité réelle au franchissement.

Si la tenue du remblai peut être démontrée, le pourcentage de vagues franchissant la crête est supposé acceptable vis-à-vis de l'ATB, quel qu'il soit, la conformité de cet item de l'ATB est considérée démontrée au chapitre 5 de l'EDD évaluant la conformité réglementaire.

	q Débit franchissant moyen (m ³ /s par m)	V_{max} Volume franchissant maximum (m ³ /m)
Digues à talus		
Aucun dégât	$q < 2 \cdot 10^{-3}$	
Dégâts si la crête n'est pas protégée	$2 \cdot 10^{-3} < q < 0.02$	
Dégâts si le talus arrière n'est pas protégé	$0.02 < q < 0.05$	
Dégâts même si la protection est complète	$q > 0.05$	

Figure 5 : Risques liés au franchissement des vagues - Guide Enrochement

Table 3.1 Limits for wave overtopping for structural design of breakwaters, seawalls, dikes and dams

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

Figure 6 : Risques liés au franchissement des vagues – EurOtop

Dans le cadre de l'analyse de risque de l'EDD, étudier les débits et volumes de surverse permet, en plus de la stabilité du barrage, d'évaluer le risque pour les piétons ou véhicules franchissant la crête de l'ouvrage et d'éventuelles problématiques d'accessibilité à certaines parties du barrage dans ces conditions pour l'exploitant. En effet, le Guide Enrochement (Figure 7) fournit le risque pour les piétons et les véhicules sur la crête d'un ouvrage en fonction des débits et volumes de surverse. Ces éléments permettent :

- Pour l'analyse des causes des ERC de prendre en compte le risque de tempête pour l'accessibilité en crête de l'exploitant (si besoin d'accéder à certains instruments de mesure ou de manœuvre ou besoin d'accéder d'un côté à l'autre de la retenue en passant par la crête)
- Pour analyser les conséquences aval d'un dépassement de la crête de l'ouvrage par un certain nombre de vagues si la crête est accessible au public (piétons) ou si une route se situe en crête (véhicules)

Il est à noter qu'en général les débits de surverse sont très faibles par rapport aux débits usuels du cours d'eau aval. Ainsi, très rapidement en aval du barrage, la surverse par la crête ou par les évacuateurs de crues (par exemple seuil calé à RN) par les vagues dues au vent ne présente aucun risque pour les pratiquants du cours d'eau.

	q Débit franchissant moyen (m ³ /s par m)	V_{max} Volume franchissant maximum (m ³ /m)
Piétons		
Dangereux pour des piétons ignorant les risques, plutôt facilement contrariés ou effrayés ; pas de visibilité claire sur la mer, passages étroits ou bord très proche	$q > 3 \cdot 10^{-5}$	$V_{max} > 2 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3}$
Dangereux pour des piétons conscients des risques, pas facilement contrariés ou effrayés, capables de tolérer d'être mouillés ; bonne visibilité sur la mer, passage plus large	$q > 1 \cdot 10^{-4}$	$V_{max} > 0.02 - 0.05$
Dangereux pour le personnel formé, bien chaussé et protégé, qui s'attend à être mouillé ; franchissement à des niveaux bas seulement, pas de retombées, faible risque de chute depuis le passage	$q > 1 \cdot 10^{-3} - 0.01$	$V_{max} > 0.5$
Véhicules		
Dangereux en cas de conduite à vitesse modérée ou rapide, franchissement impulsif donnant lieu à des retombées ou à des jets très rapides	$q > 1 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-5}$	$V_{max} > 5 \cdot 10^{-3}$
Dangereux en cas de conduite au pas, franchissement par écoulements pulsatoires à des niveaux bas seulement, pas de retombées	$q > 0.01 - 0.05$	$V_{max} > 0.1$

Figure 7 : Risques liés au franchissement des vagues pour les piétons et les véhicules – Guide Enrochement

4. CONCLUSION

Les méthodes historiques utilisées par EDF pour étudier les vagues dues aux vents dans le domaine des barrages présentaient des limites. L'utilisation d'un coefficient k en milieu de méthode faussait les pourcentages réels de vagues franchissant l'ouvrage et la démonstration de sûreté. EDF a donc fait le choix d'une mise en conformité complète des méthodes utilisées, à l'état de l'art européen en s'appuyant sur les standards des digues maritimes qui bénéficient d'un retour d'expérience beaucoup plus conséquent.

Une méthode en 3 étapes est ainsi retenue, chaque étape suivant une référence actuelle et reconnue :

1. Détermination du vent à l'aide de l'Eurocode 1 ;
2. Détermination des hauteurs de vague à l'aide du Guide enrochement ;
3. Etude du franchissement, notamment en débit et volume à l'aide de l'EurOtop.

Cette approche permet aujourd'hui à EDF d'établir avec confiance une démonstration de sûreté plus robuste. En plus d'étudier la conformité vis-à-vis de l'ATB au chapitre 5 de l'EDD, cette approche analyse aussi l'accessibilité de la crête de l'ouvrage aussi pour l'exploitant (analyse des événements initiateurs) et pour la population (conséquences aval d'un éventuel ERC de surverse due au vent) améliorant l'analyse de risque de l'EDD.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier Florence Lafon, experte hydraulique d'EDF-CIH au moment où la méthode a été établie. Son expertise en hydraulique maritime et fluviale a permis de mettre en cohérence les deux domaines et ramener à l'état de l'art nos pratiques sur le sujet pour les barrages.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Arrêté du 6 août 2018 fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages – MTES – 06/08/2018
- [2] Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues des barrages – CFBR – 06/2013
- [3] EUROCODE 1 – NF P06-114-1, NF EN 1991-1-4
- [4] Guide Enrochement – L'utilisation des enrochements dans les ouvrages hydrauliques - Version française du Rock Manual (2ème édition) – CETMEF – 2009
- [5] EurOtop – Manual on wave overtopping of sea defences and related structures – second edition 2018 + Errata of November 2019 to EurOtop 2018 – 11/2019
- [6] ROSA 2000 édition n°1 - Recommandations pour le calcul aux états-limites des ouvrages en site aquatique – METL, CETMEF
- [7] Coastal Engineering Manual – US Army Corps of Engineers – EM 1110-2-1100.
<http://chl.erdc.usace.army.mil>, 2009
- [8] Wave Directions in a Narrow Bay, Heidi Pettersson, Kimmo K. Kahma, and Laura Tuomi, Journal of Physical Oceanography, Vol. 40 Issue 1, p155-169, 01/01/2010, DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JPO4220.1>
- [9] L'évacuation massive des populations – Les territoires face à l'inondation – CEPRI – 05/2014