

Les vagues dans les retenues d'altitudes : analyse et méthodes pour la prévention

Édifiées dans les stations de loisirs de montagne pour la production de neige de culture, les retenues d'altitude, comme tout ouvrage hydraulique, sont soumises aux aléas météorologiques qui peuvent générer des risques pour la sécurité publique. Les auteurs s'intéressent ici aux conséquences des vagues provoquées par le vent et les mouvements gravitaires rapides sur de tels ouvrages et étudient les moyens de protection à mettre en place.



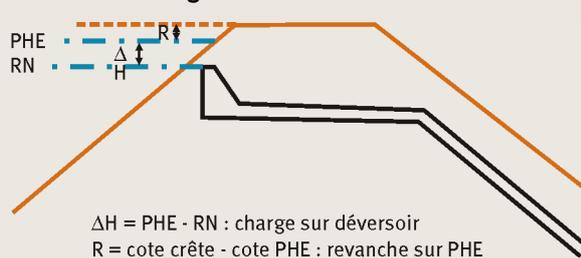
Les retenues d'altitude sont des lacs artificiels destinés à la production de la neige de culture pour assurer l'enneigement des pistes de ski. Elles sont, comme tout plan d'eau, soumises aux aléas* météorologiques tels que les pluies et le vent. Ce dernier génère des vagues dont

l'amplitude dépend de sa force et de la surface du lac. Une revanche*, garde en hauteur ménagée entre la crête du barrage et la cote des plus hautes-eaux, doit donc être prévue pour faire face à de telles vagues. Pour des raisons pratiques et économiques, les retenues destinées à la production de la neige de culture, sont la plupart du temps localisées au voisinage immédiat des pistes de ski et des secteurs de fortes pentes. Il est alors nécessaire pour la sécurité publique de s'assurer que le secteur choisi pour leur édification soit suffisamment éloigné des extensions connues de tout mouvement gravitaire* rapide tel que les avalanches*, les laves torrentielles* et les écroulements rocheux. Si un risque* de cette nature est malgré tout identifié et qu'aucune autre localisation n'est envisagea-

ble, il est recommandé de mettre en place les protections adéquates et suffisantes pour éviter qu'un volume significatif n'impacte le lac. Le volume de ce dernier étant relativement limité, une avalanche peut le vider en déversant l'eau de la retenue vers l'aval et en endommageant la structure même de l'ouvrage géotechnique, comme cela a été observé en 2006 à Pelvoux. Enfin, si un volume limité pénètre dans la retenue, la vague produite doit être calculée et une revanche suffisante doit être prévue pour éviter le débordement du lac.

Après l'introduction de la notion de revanche d'un barrage, nous présentons successivement les connaissances et les méthodes à utiliser pour caractériser les vagues produites par le vent et par les mouvements gravitaires rapides. Les connaissances scientifiques et techniques relatives aux surélévations que les ondes de gravité produisent sur les berges sont présentées et discutées. Un cadre théorique qui permet de comparer les surélévations produites par tout type de vague sur une berge est développé. Il a permis de montrer les similitudes et les différences entre les vagues produites par le vent et les vagues produites par les mouvements gravitaires rapides. La fin de l'article est consacrée à la description des méthodes et des outils pour l'ingénierie.

1 Section du barrage au droit de l'évacuateur et revanche sur les PHE destinés à la protection contre les vagues

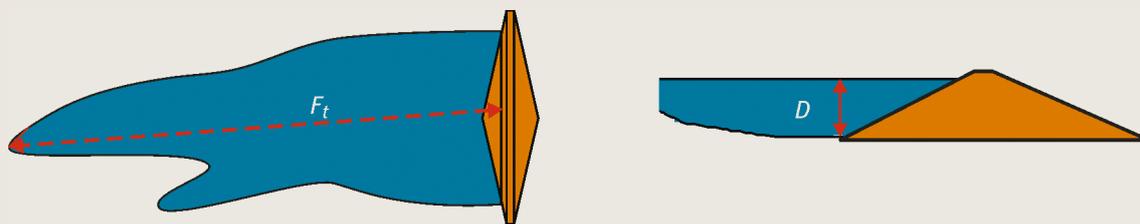


Hauteur du remblai et revanche

Sur un site donné, le calcul de la hauteur du barrage se fait en cinq étapes :

- détermination, à partir de la topographie de la cuvette et des volumes de déblais, de la cote de la retenue normale (RN*) permettant de stocker le volume utile souhaité ;
- calcul du niveau des plus hautes eaux (PHE*) pour la crue de projet ;

2 Longueur de fetch dans le cas d'un vent soufflant dans le sens de la plus grande longueur et profondeur d'eau pour le cas de projet considéré (RN ou PHE)



- détermination de la revanche, en examinant deux situations de projet vis-à-vis du vent ;
- dans des cas très particuliers, vérification que la revanche est suffisante pour les vagues créées par les avalanches et chutes de blocs survenant *a priori* lorsque la retenue est à la RN ;
- et enfin calcul, s'il y a lieu, du tassement.

La revanche est la différence d'altitude entre la crête de l'ouvrage et le plan d'eau pour la situation de projet considérée. On doit s'intéresser à la revanche sur les plus hautes eaux (PHE) ainsi qu'à la revanche sur la retenue normale (figure 1). Elle est destinée à éviter que l'impact des vagues sur la crête puisse l'endommager. Les vagues sont régulièrement provoquées par le vent, et accidentellement par des chutes de blocs, des avalanches ou des laves torrentielles. Le projeteur retiendra pour la cote de la crête, la valeur la plus élevée.

Onde produite par le vent

La principale cause de la formation des vagues dans les retenues d'altitude est le vent. À la surface de l'eau, le vent s'écoule de façon turbulente* et provoque l'apparition d'ondulations plus ou moins marquées en fonction de sa force. En effet, aux échelles locales, le champ des pressions n'est pas uniforme. Ces intermittences produisent des vagues dont l'amplitude et la longueur d'onde dépendent de la force induite par la vitesse du vent et de la surface du lac.

Ces vagues peuvent se propager en direction du barrage. En supposant que le vent souffle en direction du barrage, les vagues formées se réfléchissent sur le parement. En fonction de la différence d'altitude existant entre la cote du plan d'eau pour le vent considéré et la crête, un certain pourcentage des vagues passe par-dessus la crête et ruisselle sur le parement aval. Une érosion plus ou moins importante de la crête et du parement aval en résulte. On doit donc adopter une revanche suffisante pour que le pourcentage de vagues qui l'atteignent soit très faible. Pour chaque situation de projet vis-à-vis du vent, le calcul de la revanche s'effectue en deux étapes :

- connaissant la vitesse du vent, on estime la hauteur des vagues. Plutôt que la hauteur maximale des vagues, on s'intéresse à la hauteur significative (notée H_s), c'est-à-dire la hauteur moyenne du tiers supérieur de toutes les vagues du spectre ;

- on estime la hauteur atteinte lors de la réflexion sur le parement qui permet de fixer la revanche minimale nécessaire.

Pour le calcul de la hauteur des vagues, on propose d'utiliser la formule de Smith (1991), adaptée aux conditions d'eau profonde :

$$H_s = 0,00048 \cdot \hat{U}_a \sqrt{F_t} \quad \text{1}$$

où H_s désigne la hauteur significative des vagues en m ; F_t est la longueur du fetch* (surface d'eau continue sur laquelle le vent souffle) de la retenue en m (figure 2) ; \hat{U}_a désigne la vitesse efficace du vent mesurée (ou ajustée) à 10 m du sol en m/s, soit :

$$\hat{U}_a = U_a \cdot \cos \theta \quad \text{2}$$

avec θ l'angle entre les directions du vent et des vagues et $U_a = U \sqrt{(0,75 + 0,067 \times U)}$ avec U vitesse moyenne sur une heure du vent à 10 m au-dessus de la surface de l'eau, pour la période de retour* considérée.

En l'absence d'information particulière sur la direction des vents, on prendra :

$$\hat{U}_a = U_a \quad \text{3}$$

Dans le cas des vents supérieurs à 120 km/h qui sont rencontrés en montagne, cette méthode donne de meilleurs résultats que celle de Bretschneider, dont les formules font également intervenir la profondeur D du plan d'eau, et qui est proposée dans l'ouvrage du Comité français des barrages et réservoirs (CFBR*, 1997).

La durée minimale de vent (t_{min} en secondes) nécessaire à la formation des vagues peut être obtenue par application d'une autre formule de Smith (1991) :

$$t_{min} = \frac{27 \cdot F_t^{0,72}}{\hat{U}_a^{0,44}} \quad \text{4}$$

La vitesse moyenne du vent sur une heure (U_{3600}) est liée à la vitesse $U_{t_{min}}$ correspondant à t_{min} par la formule suivante (USACE*, *US Army Corps of Engineers*, 2003) :

$$\frac{U_{t_{min}}}{U_{3600}} = 1,277 + 0,296 \cdot \tanh \left(0,9 \log \left(\frac{45}{t_{min}} \right) \right) \quad \text{5}$$

(formule valable pour $t_{min} < 3\,600$ s, ce qui est en principe très largement assuré pour les retenues d'altitude).

Un calcul itératif permet de déterminer U_a correspondant à la donnée de base du vent mesurée au sol.

Les vitesses de vent données sont en général fournies pour une station terrestre et doivent dans ce cas être corrigées du fait du passage du vent sur la surface très lisse du plan d'eau (majoration de 1,01 pour $F_t = 100$ m, 1,06 pour $F_t = 500$ m et 1,1 pour $F_t = 1\,000$ m [Saville, 1962]).

① Hauteur significative des vagues (H_s) en fonction de la vitesse du vent au sol (U), de la longueur de fetch de la retenue (Ft) et de sa profondeur (D)

D (m) ⁴	U Ft (m)	120 km/h		150 km/h		180 km/h	
		100	500	100	500	100	500
5		0,27	0,59	0,49	0,98	0,64	1,26
10		0,28	0,61	0,49	1,02	0,64	1,34
15		0,28	0,61	0,49	1,02	0,64	1,34

► Le tableau ① donne les valeurs de la hauteur significative des vagues pour des cas courants (profondeur de l'eau D et longueur du fetch Ft en mètres), calculée par la méthode de Smith. Les valeurs données pour $D = 5$ m sont un peu différentes, car elles résultent de l'application de formules valables en eau non profonde, dues à Bretschneider et Reid (USACE, 1984). Elles conduisent à des valeurs légèrement inférieures, d'au plus 6 % dans les exemples du tableau.

La hauteur de vague de projet permettant de calculer la revanche minimale est ensuite estimée par rapport à la vague significative. Pour les barrages dont le parement aval est enherbé ou protégé, on peut tolérer que 5 % des vagues atteignent la crête. Dans cette hypothèse, il faut prendre comme hauteur de vague de projet : $H_d = 1,25.H_s$ (Commission internationale des grands barrages, CIGB*, 1993).

Onde générée par les mouvements gravitaires rapides

Les nombreuses possibilités de mouvements gravitaires rapides dans le voisinage immédiat des retenues d'altitude, rendent cruciale l'étude des vagues que la chute d'un volume subaérien, même faible, peut induire dans

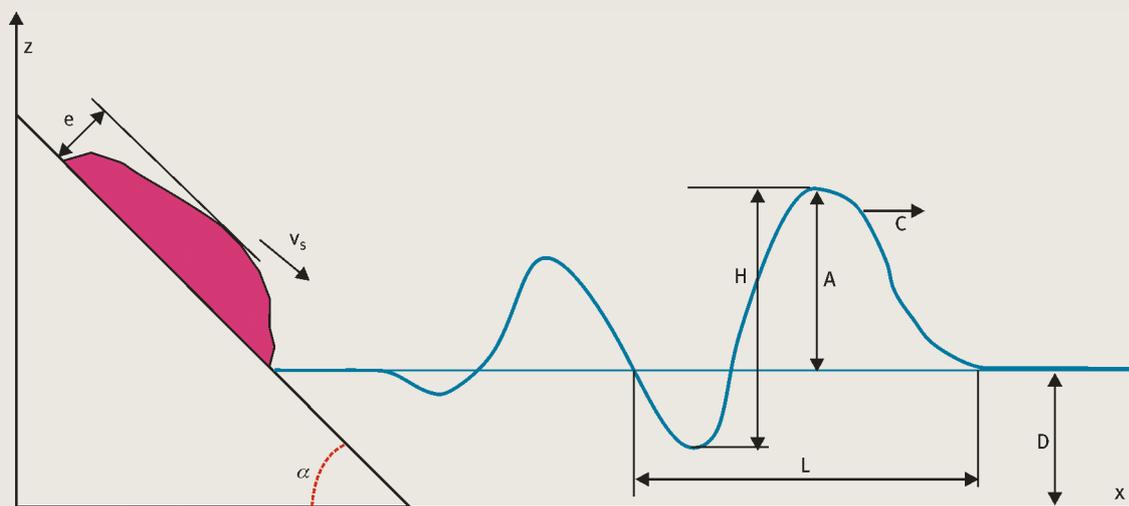
une retenue. Cette chute peut donner naissance à une vague et un train d'onde qui une fois créés, se propagent à l'intérieur du plan d'eau et rencontrent rapidement une berge ou le parement du barrage où ils sont réfléchis en produisant une surélévation (run-up*) susceptible de conduire au débordement de la retenue.

L'évaluation de l'aléa que représentent les vagues dans une retenue repose sur un ensemble de connaissances obtenues pour l'essentiel grâce à des expérimentations de laboratoire en canal horizontal équipé d'une rampe de pente variable sur laquelle glissent les matériaux simulant le mouvement gravitaire rapide (figures ③ et ④).

Les paramètres de contrôle des expériences sont la masse volumique du glissement ρ , son volume V_s (ou son épaisseur e et sa longueur l_s), la vitesse de son centre de gravité à l'impact v_s , la profondeur d'eau D , la pente du terrain α . Les paramètres mesurés en fonction du temps t et de la distance du point d'impact x sont le déplacement de la surface d'eau $v(x,t)$, l'amplitude de la vague principale A , sa vitesse de propagation C et sa longueur d'onde L .

La similitude entre un phénomène réel et une expérimentation en modèle réduit est assurée grâce aux critères de similitudes obtenus par adimensionnalisation des paramètres classiques de la mécanique des fluides*. Les principaux nombres sans dimensions qui gouvernent la génération des vagues sont :

③ Schéma et notations utilisées pour les vagues produites par l'impact d'un glissement rapide



- l'épaisseur relative : $E = \frac{e}{D}$
- le volume relatif : $\frac{V_s}{bD^2}$
- le rapport des masses volumiques : $\frac{\rho_s}{\rho_w}$
- le nombre de Froude d'impact : $F = \frac{v_s}{\sqrt{gD}}$

L'ensemble des résultats sera exprimé en fonction de ces quatre nombres sans dimension.

Nous avons fait le choix de ne considérer que quelques travaux récents représentatifs des résultats existants, dont ceux de Fritz (2003). Cet auteur a investigué de manière très fine, numériquement et expérimentalement, la phase d'interaction entre un glissement granulaire et un plan d'eau. Cette étude a donné des informations très utiles à propos :

- des processus d'interaction entre la masse solide et l'eau et la formation d'un cratère entre le glissement et le plan d'eau ;
- des volumes d'eau mis en mouvement ;
- et des caractéristiques des vagues produites, c'est-à-dire leurs natures et leurs amplitudes.

Interaction glissement/eau : apparition d'un cratère

Pour une large gamme de nombres de Froude* d'impact F et d'épaisseurs relatives E , l'impact provoque une séparation hydrodynamique (cratère) entre la masse glissante et l'eau. Cette séparation n'apparaît que pour les impacts vérifiant la condition suivante (figure 5, à gauche) :

$$F > \frac{5}{3} + \frac{1}{2}E \quad \text{6}$$

Le cratère se referme vers l'amont, c'est-à-dire sur le front du glissement, dans sa phase de décélération, si la condition suivante est en outre vérifiée (figure 5, au centre) :

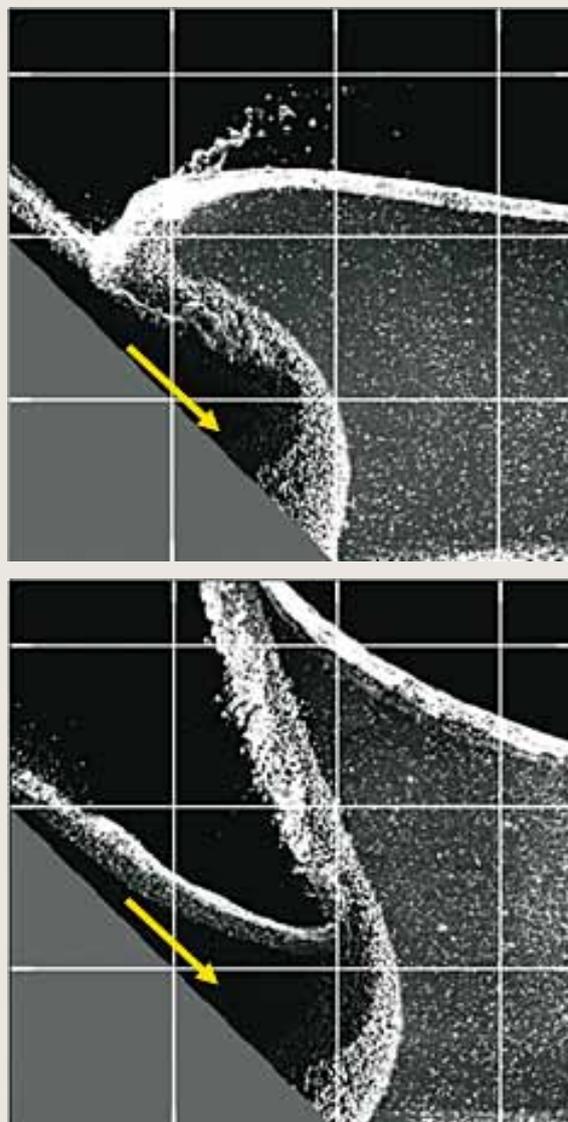
$$F < 4 - \frac{5}{2}E \quad \text{7}$$

Au-delà de $4 - 5E/2$, la masse d'eau déplacée plonge vers l'aval (figure 5, à droite). Ces phénomènes ont une grande importance dans les processus de formation de la vague.

Volume d'eau déplacé

L'étroitesse des retenues d'altitude fait que les phénomènes locaux induits par l'interaction entre le glissement et le plan d'eau (volume d'eau déplacé) deviennent primordiaux. Le déplacement du glissement dans l'eau entraîne la mise en mouvement d'un volume d'eau (V_d) et d'un débit Q_d défini comme le gradient temporel du volume d'eau (V_d). L'évolution de ces deux grandeurs en fonction du temps a été investiguée. En traçant le volume déplacé divisé par sa valeur maximale en fonction du temps après l'impact (t_d) divisé par le temps (t_{VD}) correspondant au volume maximal, tous les résultats expérimentaux sont situés sur une même courbe maîtresse, montrant l'existence d'une loi d'échelle générique. La forme de cette courbe est de type sinus. Le calage sur les résultats expérimentaux a permis à Fritz (2003) de dégager la formule

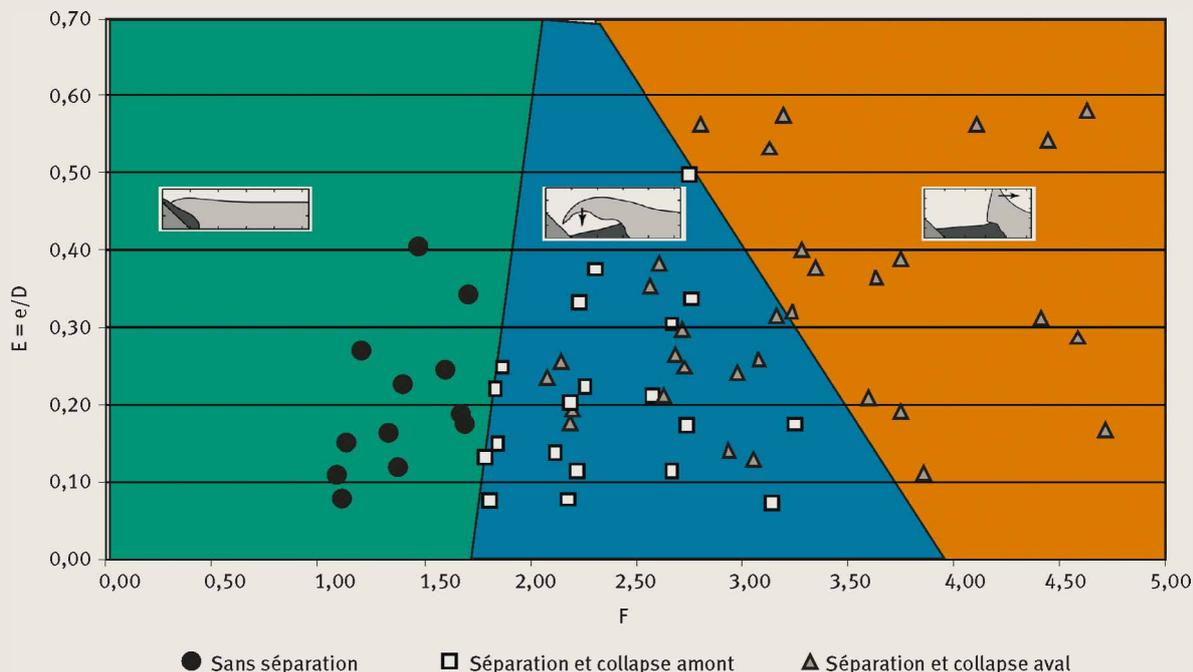
- 4 Impact sans séparation pour un nombre de Froude de 1,4 et une épaisseur relative de 0,23 ($5/3 + E/2 = 1,41$) et impact avec séparation pour un nombre de Froude de 3,6 et une épaisseur relative de 0,21 ($4 - 5.E/2 = 3,5$) (d'après Fritz, 2003)



empirique (équation 8) qui relie le volume d'eau déplacé au temps. Le volume maximum (V_d) varie entre 1,8 à 8 fois le volume solide (V_s). Le volume déplacé pour des écoulements, sans cratère, est compris entre une et deux fois le volume solide (V_s). Le volume maximum normalisé par (bD^2) et le temps correspondant (t_{VD}) normalisé par $\sqrt{\frac{g}{d}}$, varient en fonction du nombre de

Froude d'impact et du volume sans dimension du glissement selon les équations 9 et 10. L'épaisseur relative du glissement n'a pas beaucoup d'influence sur le volume déplacé. Suivant la même procédure, Fritz (2003) a établi une loi d'échelle (équation 11) qui relie le débit normalisé par le débit maximum au temps normalisé par le temps correspondant au débit maximum (t_{Qd}) et une loi

5 Conditions d'apparition entre le glissement et la masse d'eau et dynamique du cratère en fonction de E et F



► d'échelle (équation 12) qui relie le temps t_s que met le glissement solide pour s'arrêter. Le débit maximum (Q_D) varie de 1,7 à 2,8 fois le débit solide maximum $Q_s = v_s e b$ et de 1,7 à 4,8 fois le débit solide moyen défini comme le volume du glissement divisé par le temps entre

l'impact et l'arrêt du glissement $\bar{Q}_s = \frac{V_s}{t_s}$.

Le débit maximum Q_D et le temps (t_{qd}) ont été reliés aux grandeurs sans dimensions caractéristiques par l'équation 13 et l'équation 14. Contrairement au volume d'eau déplacé, le débit est significativement influencé par l'épaisseur relative. Les modèles de type Saint-Venant ou Boussinesq utilisés pour l'étude de la propagation des vagues, ne peuvent simuler de manière pertinente l'interaction entre le glissement et le plan d'eau. Ces deux dernières relations peuvent être utilisées comme condition à la limite de ces modèles pour rendre compte du phénomène complexe et tridimensionnel de génération de la vague.

Caractéristique des ondes produites

De l'interaction chaotique et tridimensionnelle, émerge une vague cohérente avec des caractéristiques définissables telles que la forme, l'amplitude et la longueur d'onde. Cette vague principale est suivie d'un train d'onde. De nombreux travaux ont permis de dégager des lois d'échelle permettant de prédire la nature, la forme, l'amplitude et la longueur d'onde.

Nature des ondes

La nature de la vague principale produite dépend du nombre de Froude d'impact et de l'épaisseur relative du glissement. Elle est de type sinusoïdale si $F < 4 - 7.5E$.

Elle est de type cnoïdale si $4 - 7.5E < F < 6.6 - 8E$. Elle est de type solitaire si $6.6 - 8E < F < 8.2 - 8E$. Au-delà, les vagues produites sont des ressauts mobiles.

Amplitude de la vague

La distance x_g parcourue par le glissement sous l'eau est donnée par :

$$\frac{x_g}{D} = 3.7F^{0.3} \left(\frac{V_s}{bD^2} \right)^{0.3} \quad (15a)$$

La durée t_s du mouvement du glissement dans l'eau est donnée par :

$$t_s \sqrt{\frac{g}{D}} = 5.2F^{-0.2} \left(\frac{V_s}{bDe} \right)^{0.3} \quad (15b)$$

La distance par rapport au point d'arrêt du glissement, où l'amplitude de la vague atteint sa valeur maximale est comprise entre une et trois fois la profondeur d'eau D . À cette distance, l'amplitude de la vague principale peut être estimée en exploitant les nombreuses lois empiriques disponibles, comme par exemple celle proposée par Fritz (2003). Elle exprime (figure 6) l'amplitude relative en fonction du nombre de Froude d'impact et de l'épaisseur relative selon la formule :

$$\frac{A}{D} = 0.25 \left(\frac{e}{D} \right)^{0.8} F^{1.4} \quad (16a)$$

Cette formule, établie pour une masse volumique de $1\,620 \text{ kg/m}^3$, montre que pour un glissement donné, l'amplitude de la vague diminue proportionnellement à la racine carrée de la profondeur d'eau D .

Concernant l'influence de la masse volumique, Selingerland et Voight (1980) ont montré que l'amplitude relative est proportionnelle au rapport des masses volumiques à

la puissance 0,71 alors que Huber et Hager (1997) ont proposé une puissance de 0,25 montrant ainsi toute la méconnaissance actuelle concernant l'effet de la masse volumique, sur la vague produite. Pour plus de sécurité, nous recommanderons de retenir 0,25.

Fritz (2003) a aussi établi la formule empirique suivante pour la longueur de l'onde principale à une distance de 5D du point d'impact :

$$\frac{L}{D} = 8,2F^{0,5} \left(\frac{V_s}{bD^2} \right)^{0,8} \quad 16b$$

Longueur d'onde et étalement du front

Dans les travaux antérieurs disponibles, les vagues produites par l'impact d'un mouvement gravitaire rapide sont caractérisées par une amplitude relative A/D comprise entre 4 et 12. Elles appartiennent à la classe des ondes dispersives. Le rapport de leur longueur d'onde à la profondeur d'eau D est compris entre 1 et 10. Elles appartiennent à la classe des ondes non linéaires. La géométrie des retenues d'altitude n'est pas toujours simple. Leur extension est par contre relativement limitée : tout au plus quelques dizaines de fois la profondeur d'eau. La propagation de la vague ne peut être considérée comme unidimensionnelle que si la largeur du glissement est proche de la largeur de la retenue et que, dans la direction de propagation, le plan d'eau ne présente pas de variation significative de largeur ou de profondeur. Dans le cas contraire, la réfraction sur le fond, l'étalement du front et les multiples réflexions sur les berges viendront se rajouter aux effets non linéaires et dispersifs. Il

1 LES LOIS D'ÉCHELLE GOUVERNANT LA GÉNÉRATION DES VAGUES PRODUITES PAR LES MOUVEMENTS GRAVITAIRES RAPIDES

$$\frac{V_d}{V_D} = \sin \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{t_d}{t_{VD}} \right)^{\frac{3\pi}{8}} \right) \quad 8$$

$$\frac{V_D}{bD^2} = 0,8F \sqrt{\frac{V_s}{bD^2}} \quad 9$$

$$t_{VD} \sqrt{\frac{g}{D}} = 1,7F^{0,3} \left(\frac{V_s}{bD^2} \right)^{0,2} \quad 10$$

$$\frac{Q_d}{Q_D} = \frac{9}{4\pi} \cos \left(\frac{\pi}{2} \left(\frac{t_d}{t_{qD}} \right)^{\frac{3\pi}{8}} \right) \frac{3\pi^2}{16} \left(\frac{t_d}{t_{qD}} \right)^{\frac{3\pi}{8}-1} \quad 11$$

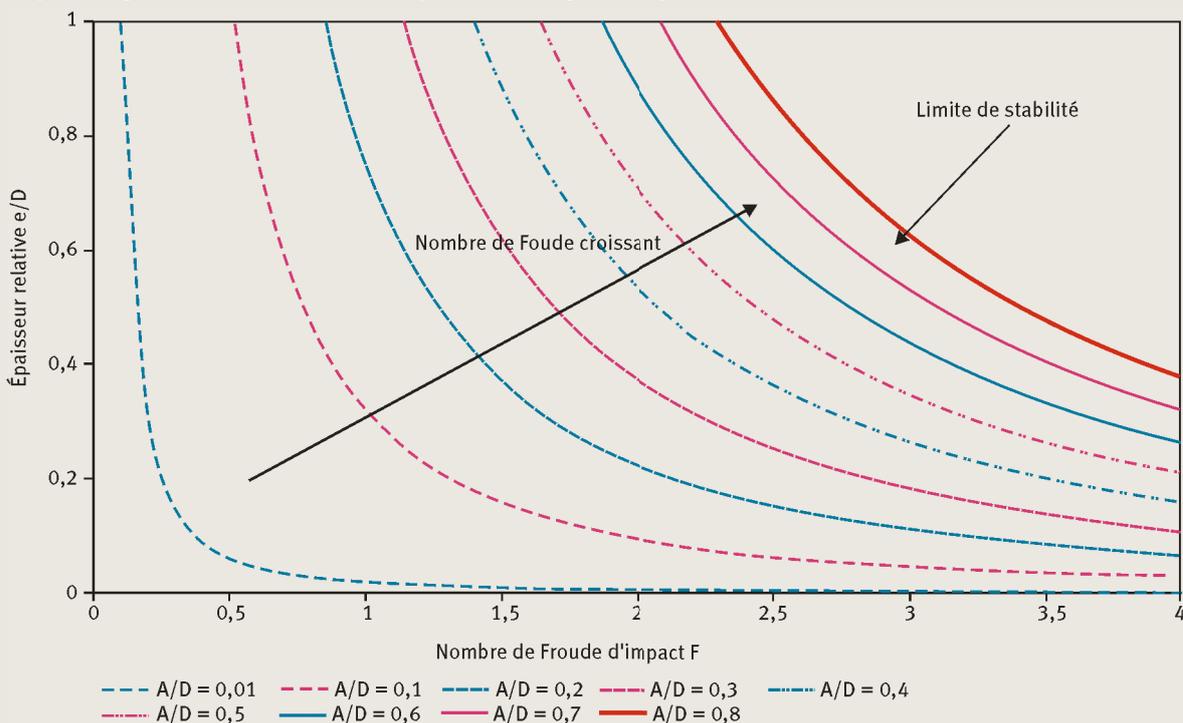
$$t_s \sqrt{\frac{g}{D}} = 5,2F^{-0,2} \left(\frac{V_s}{beD} \right)^{0,3} \quad 12$$

$$\frac{Q_D}{bD \sqrt{gD}} = 0,6F \left(\frac{e}{D} \right)^{0,3} \quad 13$$

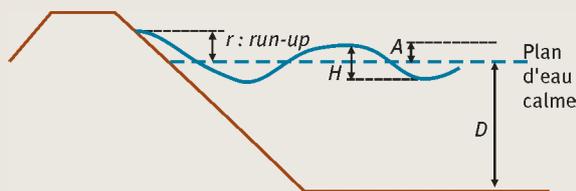
$$t_{qD} \sqrt{\frac{g}{D}} = 2,2F^{-1,6} \left(\frac{V_s}{bD^2} \right)^{0,6} \left(\frac{e}{D} \right)^{-0,8} \quad 14$$

est alors recommandé d'utiliser un modèle numérique bidimensionnel de type ondes longues pour la phase de propagation.

6 Amplitudes relatives A/D en fonction du nombre de Froude F et des épaisseurs relatives e/D pour un glissement de masse volumique de 1 500 kg/m³, d'après Fritz (2003)



7 Run-up dans le cas d'une onde sinusoïdale



Run-up

Lorsqu'une vague de raideur A/L se propage sur un plan d'eau de profondeur moyenne D , et rencontre une berge ou un parement de barrage de pente α , il en résulte, au niveau de la berge, une surélévation par rapport au niveau moyen du lac. Cette surélévation est habituellement appelée run-up et notée r (figure 7).

Une littérature abondante traite de cette question, mais dans la plupart des cas, ce problème est réduit à l'étude d'une onde simple sur un fond de profondeur constante interagissant avec une plage monodimensionnelle, ne comportant qu'une seule rupture de pente. Les critères et lois de run-up disponibles sont fondés sur cette représentation.

2 Run-up relatif r/H_d pour un parement lisse

Pente du talus amont →	1/3	1/2,5	1/2
$H_d/L = 0,1$	1,15	1,4	1,9
$H_d/L = 0,08$	1,37	1,64	2,0
$H_d/L = 0,07$	1,49	1,73	2,0

3 Run-up pour un parement amont lisse de pente 1/3

$D \downarrow$	$U \rightarrow$	120 km/h		150 km/h		180 km/h	
	$F_t \rightarrow$	100 m	500 m	100 m	500 m	100 m	500 m
5 m		0,53	1,13	0,71	1,48	0,92	1,85
10 m		0,53	1,19	0,71	1,61	0,92	2,06
15 m		0,53	1,19	0,71	1,63	0,92	2,06

4 Run-up pour un parement amont rugueux de pente 1/3

$D \downarrow$	$U \rightarrow$	120 km/h		150 km/h		180 km/h	
	$F_t \rightarrow$	100 m	500 m	100 m	500 m	100 m	500 m
5 m		0,32	0,68	0,43	0,89	0,55	1,11
10 m		0,32	0,72	0,43	0,96	0,55	1,23
15 m		0,32	0,72	0,43	0,98	0,55	1,23

Run-up dans le cas des ondes sinusoïdales

Pour les vagues sinusoïdales produites par le vent, on distingue deux cas selon que la plage est lisse ou rugueuse.

Le premier cas est celui d'un parement amont lisse (par exemple géomembrane* non recouverte). Le run-up relatif de la vague (r/H_d) est donné par le tableau 2 (Saville, 1962) en fonction de la pente du talus et de H_d/L ; L est la longueur d'onde des vagues qui est donnée par :

$$L = 1,56.T^2 \quad 17$$

Cette formule n'est valable que si $D > L/2$. T est la période du pic spectral des vagues. Elle peut être estimée par la formule suivante due à Smith (1991) :

$$T = 0,0716.Ft^{0,28} / \hat{U}_a \quad 18$$

Ces résultats conduisent aux valeurs du tableau 3, dans le cas d'une pente de 1/3, habituelle en cas de géomembrane.

Le second cas, est celui d'un parement amont rugueux (par exemple, géomembrane recouverte par des enrochements). Le run-up des vagues est moins important. On propose, selon les publications de l'*Institution of Civil Engineers* (1996) et le *South African Committee on Large Dams SANCOLD* (1990), de prendre 60 % du run-up calculé pour un parement amont lisse. D'où le tableau 4 construit à partir du tableau 3.

Le troisième cas à envisager est celui où la protection rugueuse de la géomembrane est enneigée ou englacée (notamment dans les zones où des congères* peuvent se former sous l'effet du vent). Le problème des vagues ne se pose que si la retenue n'est pas elle-même prise en glace (photo 1). On a déjà constaté qu'un barrage à 2 800 m d'altitude était dans cette situation au 15 juin avec parement amont englacé (ainsi que la crête et l'éva-



1 Parement amont englacé ainsi que le plan d'eau.

cuateur de crue*) et retenue non prise en glace. De même, un barrage à 2 200 m a eu, début juin, son parement amont fortement enneigé, voire englacé alors même que l'exploitant aurait pu remplir la retenue. La recommandation de base est donc d'étudier au cas par cas si cette circonstance doit être envisagée, en fonction de l'orientation des vents dominants et du mode de gestion de la retenue à la période de fin d'hiver où les crues sont fortes. Cela pourra le conduire à adopter une revanche supérieure à celle donnée par un calcul avec parement rugueux et pouvant atteindre celle du calcul avec parement lisse.

Quelle que soit la rugosité du parement amont, pour une pente de 1/2,5, les valeurs de run-up obtenues pour une pente de 1/3 sont à multiplier par 1,2. Pour une pente de 1/2, elles sont à multiplier par 1,4.

Pour le dimensionnement de la revanche, nous proposons de considérer deux situations de projet :

- un vent de période de retour 50 ans soufflant pendant une crue de projet (entre millénale et décennale en cas de menace pour la sécurité publique) sur une retenue qui se trouve donc à la cote des plus hautes eaux (PHE) ;
- un vent de période de retour 1 000 ans, soufflant sur la retenue normale.

En l'absence de données pour des périodes de retour élevées, on pourra admettre que la vitesse du vent pour une période de retour 1 000 ans vaut 1,2 fois celle pour 50 ans (ROSA, 2000). Par exemple, si la vitesse de vent cinquantennale vaut 150 km/h (colonne centrale des tableaux), la vitesse millénale vaut 180 km/h (colonne de droite).

En pratique, on constate dans ce cas, sur le tableau 4, que pour un parement rugueux et une pente de 1/3, la valeur de déferlement est supérieure de 12 à 27 cm dans le cas du vent millénal. Or, en principe, la différence entre PHE et RN est largement supérieure à cette valeur. Le cas dimensionnant est donc en général celui du vent cinquantennal sur retenue aux PHE.

Mais dans le cas d'un parement amont lisse (tableau 3), la différence est de 21 à 43 cm. Pour les petits bassins versants*, conduisant à une faible lame d'eau, le cas dimensionnant pourra être celui du vent millénal sur retenue normale.

Nous attirons aussi l'attention sur le fait que la revanche doit être assurée en considérant le point le plus bas de la crête. À l'exécution, il n'est pas rare de voir des fluctuations de plus ou moins 20 cm sur la cote théorique de la crête. Le concepteur doit donc s'assurer que la cote contractuelle de la crête est partout atteinte. Si cela est nécessaire, il doit aussi intégrer, dans la conception, la valeur estimée du tassement de l'ouvrage et de la fondation. Une contre-flèche est classiquement prévue pour compenser ces tassements. Cette disposition évite, qu'après tassement, la revanche soit diminuée au centre du barrage. Mais cela ne vaut que si l'évacuateur est en rive et donc ne tasse pas. Lorsqu'il est au centre du barrage, il suit le mouvement du remblai. Une contre-flèche aurait dans ce cas pour conséquence immédiate de diminuer la revanche sur les bords. C'est le contraire de ce que l'on cherche.

En conclusion, nous constatons que la revanche nécessaire pour les vagues varie dans une large gamme en fonction des conditions de vent, de la longueur de la retenue, de la pente du talus amont et de sa rugosité. Un calcul est donc indispensable à chaque fois. Le cas d'une géomembrane lisse est nettement plus défavorable et nécessite une revanche supérieure de 50 à 80 cm à celui d'une géomembrane recouverte si la longueur de fetch vaut 500 m.

Run-up dans le cas des ondes solitaires

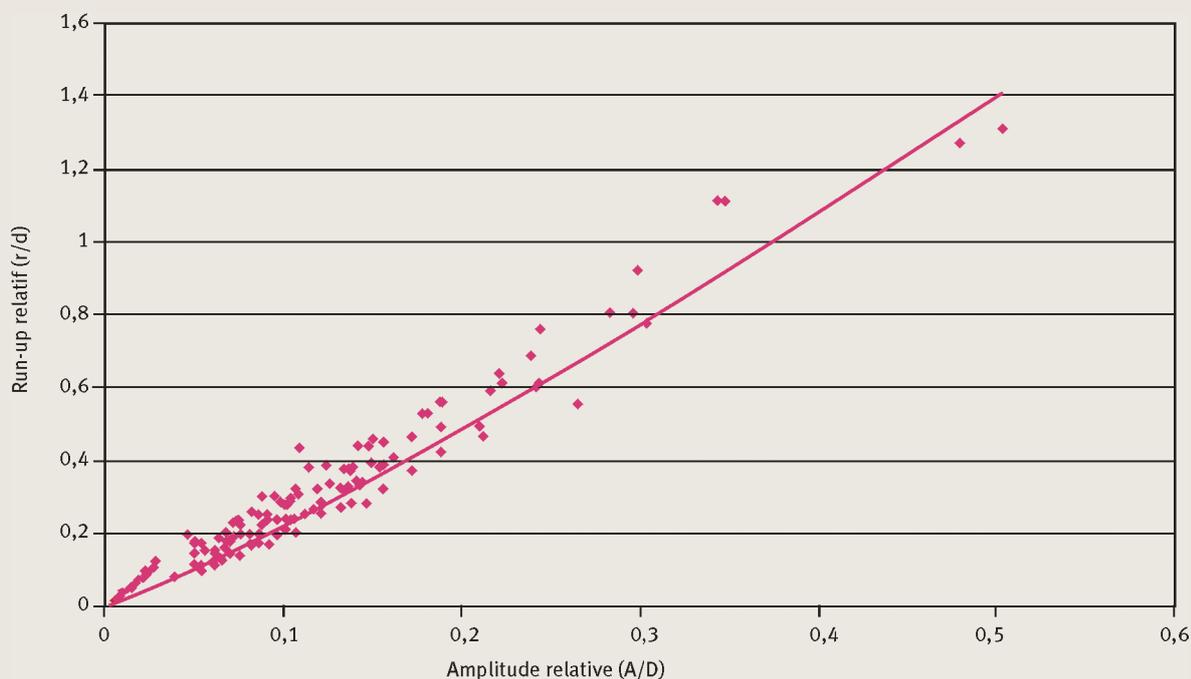
Pour les ondes solitaires, Hall et Watts (1955) ont mené une étude expérimentale très approfondie, qui fait encore référence aujourd'hui, et qui leur avait permis de construire une loi d'échelle empirique donnant le run-up normalisé par la profondeur d'eau en fonction de l'amplitude relative de l'onde incidente (figure 8) :

$$\frac{r}{D} = 3.1 \left[\frac{A}{D} \right]^{1.15} \quad 19$$

Synolakis (1987) a établi une formule donnant le run-up normalisé par la profondeur d'eau (r/D) en fonction de l'amplitude relative de la vague, pour les vagues qui déferlent :

$$\frac{r}{D} = 1.11 \left[\frac{A}{D} \right]^{0.58} \quad 20$$

8 Run-up des ondes solitaires – données tirées de la littérature sans distinction entre les vagues qui déferlent et celles qui ne déferlent pas ; tracé de la relation (19)



- Synolakis (1987) a aussi établi théoriquement une formule donnant le run-up normalisé par la profondeur d'eau (r/D) en fonction de l'angle de pente et de l'amplitude relative de la vague, pour les vagues qui ne déferlent pas lors de la phase d'approche :

$$\frac{r}{D} = \frac{2,831}{\sqrt{\tan \alpha}} \left[\frac{A}{D} \right]^{\frac{5}{4}} \quad (21)$$

Comparaison du run-up des ondes solitaires et sinusoïdales

Batjes (1974) a montré que le nombre sans dimension d'Iribarren est tout à fait pertinent pour rendre compte des transformations des ondes sinusoïdales près des plages et du run-up qui en résulte.

Le nombre d'Iribarren est donné par :

$$I_r = \frac{\tan(\alpha)}{\sqrt{\frac{H}{L}}} \quad (22)$$

Le run-up d'une onde sinusoïdale adimensionné par sa hauteur est donné par :

$$\frac{r}{H} = k I_r \quad (23)$$

où k est une constante qui dépend de la rugosité de la pente. Ainsi, pour les ondes sinusoïdales, le run-up augmente avec la pente et diminue avec la raideur de la vague (H/L). Cette approximation n'est valable que pour des nombres d'Iribarren inférieurs à 2,5. Au-delà, le rapport r/A tend vers environ 2,5 pour une surface lisse et 1 pour une surface rugueuse (figure 9 – Saville, 1955).

Pour comparer le run-up des ondes sinusoïdales à ceux des ondes solitaires, nous avons cherché à exprimer, pour les ondes solitaires, le run-up normalisé par l'amplitude de la vague en fonction du nombre d'Iribarren et de l'amplitude relative. Pour cela, nous avons dû choisir une longueur d'onde pertinente pour les ondes solitaires puisqu'en théorie leur longueur d'onde est infinie. En limitant l'extension de l'onde solitaire au domaine où la hauteur d'eau diminuée de la profondeur d'eau au repos est inférieure à 1 % de l'amplitude de la vague, la longueur de l'onde solitaire peut être donnée par :

$$L \approx 2\pi \sqrt{\frac{4 D^3}{3 A}} \quad (24)$$

La prise en compte de cette relation dans l'équation de Synolakis (1987) dédiée au run-up sans déferlement (équation 21) permet d'exprimer le run-up d'une onde solitaire normalisé par l'amplitude en fonction du nombre d'Iribarren et de l'amplitude relative sous la forme :

$$\frac{r}{A} = 4,38 I_r^{-\frac{1}{2}} \left(\frac{A}{D} \right)^{-\frac{1}{8}} \quad (25)$$

Sur fond plat, l'amplitude d'une onde solitaire normalisée par la profondeur moyenne du lac (A/D) ne peut dépasser 0,78. Au-delà, l'onde déferle. Lorsque une onde stable interagit avec une pente, elle ne déferle que si son amplitude relative vérifie le critère de Grilli

$$\left(\frac{A}{D} \right) > 17(\tan \alpha)^2.$$

Pour une pente supérieure à 12°, ce critère indique un déferlement pour une amplitude relative supérieure à

l'amplitude maximale sur fond plat (0,78). Les ondes ne peuvent déferler que sur des pentes inférieures à 12° , car sinon elles auraient déferlé avant d'atteindre la plage. Comme les pentes des retenues d'altitude sont toujours supérieures à 12° , les vagues ne peuvent déferler lors de leurs interactions avec les barrages.

Les estimations données par la formule généralisée de Synolakis sont tracées sur la figure 9 accompagnées de nombreuses données expérimentales issues de la littérature couvrant les domaines des ondes solitaires et celui des ondes sinusoïdales avec berge lisse ou rugueuse. Cette figure montre l'importante différence qui existe en termes de run-up entre les ondes sinusoïdales et les ondes solitaires pour des nombres d'Iribarren inférieur à 2,5. Au-delà par contre, le run-up des ondes solitaires et celui des ondes sinusoïdales sur parement lisse semblent plafonner à des valeurs comparables.

Si I_r est inférieur à 2,5, le run-up est égal au produit de l'amplitude de la vague par le nombre I_r pour les parements lisse et $0,4 I_r$ pour les parements rugueux.

Pour une onde solitaire, il est inutile de vérifier si la vague va déferler, sauf si la pente est inférieure à 12° , ce qui n'est en principe jamais le cas des parements des retenues d'altitude. À partir de l'amplitude de la vague, de la profondeur d'eau et de la pente, il est possible d'utiliser la plus simple des formules, c'est-à-dire celle de Hall et Watts pour estimer le run-up. Le tableau 5 présente les valeurs de run-up dans des cas courants. En outre, le graphique de la figure 9 rassemble l'ensemble des données expérimentales connues de nous. À partir de l'amplitude relative, ce graphique donne le run-up relatif. Il a l'avantage de montrer la tendance mais aussi l'incertitude liée aux données expérimentales.

Quelques conclusions pratiques

Pour les vagues dues au vent, afin d'évaluer le run-up au contact d'une berge ou d'un parement de barrage, il est possible de calculer la hauteur de vague par l'équation 1 et le run-up par les tableaux 2 et 3.

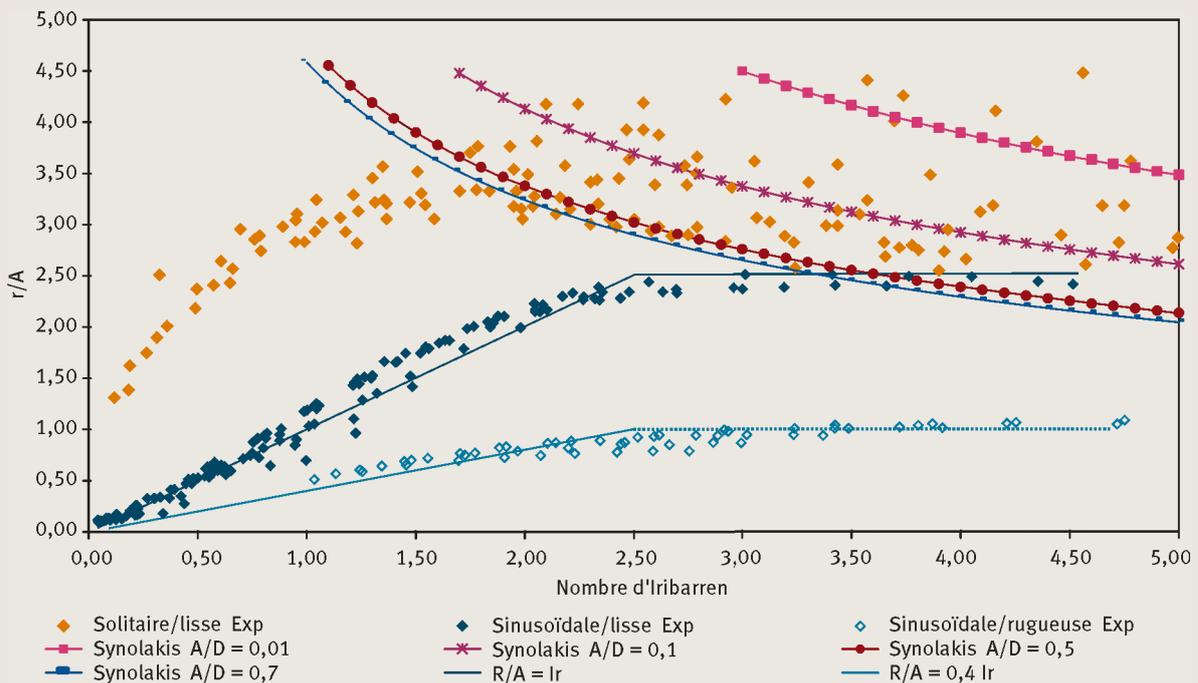
Pour les vagues de type sinusoïdales produites par les mouvements gravitaires rapides, il est possible de calculer la hauteur de vague par l'équation 16a et la longueur d'onde par l'équation 16b. Il s'en déduit le nombre d'Iribarren I_r par l'équation 22. Si I_r est plus grand que 2,5, le run-up vaut 2,5 fois l'amplitude de la vague (pour un parement lisse) et une fois (pour un parement rugueux).

Conclusion

Pour la sécurité du barrage, il est donc nécessaire de connaître l'amplitude des vagues que le vent où les mouvements gravitaires rapides peuvent produire dans la retenue car l'amplitude du run-up en dépend. En fonction du rapport entre le run-up et la revanche du barrage, la vague peut créer des désordres plus ou moins graves :

- érosion du parement amont d'un barrage, même sans surverse. À terme la marche qui se forme peut diminuer la largeur de la crête ;
- érosion de la crête et du parement aval d'un barrage en cas de surverse, avec risque de brèche ;

9 Comparaison du run-up des ondes solitaires et des ondes sinusoïdales (données fond rugueux issues de Saville [1955])



5 Run-up en fonction de l'amplitude pour une onde solitaire

D (m) →	vs (m/s) →	5		10		15		20	
	e (m) →	2	4	2	4	2	4	2	4
5	A (m) →	0,37	0,64	0,98	1,70	1,72	3,00	2,57	4,48
	Run-up (m)	0,78	1,47	2,37	4,48	4,55	8,60	7,23	13,67
10	A →	0,26	0,46	0,69	1,20	1,22	2,12	1,82	3,17
	Run-up (m)	0,47	0,89	1,43	2,71	2,75	5,20	4,37	8,27
15	A →	0,21	0,37	0,56	0,98	0,99	1,73	1,49	2,59
	Run-up (m)	0,56	1,05	1,70	3,22	3,27	6,18	5,19	9,83

- érosion des berges d'une retenue, avec risque de déclenchement d'un glissement par sapement de pied ;
- érosion des berges d'une retenue au contact du barrage avec risque de contournement.

Les vagues dues au vent ne peuvent être évitées, et nous encourageons un véritable calcul à partir des éléments ci-dessus. On notera tout particulièrement que la granularité des revêtements d'enrochements étant d'un ordre de grandeur comparable à l'amplitude des vagues, il est normal que les parements rugueux conduisent à des run-up moins importants. Dans la pratique, le choix d'une revanche suffisante permet de mettre l'ouvrage à l'abri. Outre la détermination de la revanche, le calcul des caractéristiques des vagues permet de dimensionner la taille des pierres ou blocs de protection pour qu'ils ne soient pas endommagés sous l'effet du vent.

Les vagues dues aux mouvements gravitaires rapides sont particulièrement destructrices pour les fortes épaisseurs et les fortes vitesses d'impacts (avalanches, éboulements, glissements rapides). Les forts volumes, même en cas de vitesse modérée créent également des surélévations importantes. Il est généralement possible d'éviter ces désordres en choisissant convenablement le site. Les calculs ci-dessus présentent néanmoins un intérêt pour le cas d'un risque résiduel. Enfin, ils permettent de diagnostiquer le risque présenté par une retenue artificielle ou naturelle existante. ■

Les auteurs

Mohamed Naaim

Cemagref, centre de Grenoble,
UR ETGR, Érosion torrentielle,
neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie,
BP 76,
38402 Saint Martin d'Hères Cedex
mohamed.naaim@cemagref.fr

Gérard Degoutte

Cemagref et CGAAER,
centre d'Aix-en-Provence, GR OHAX,
Ouvrages hydrauliques,
3275 route de Cézanne,
CS 40061,
13182 Aix-en-Provence Cedex 5
gerard.degoutte@cemagref.fr

François Delorme

Électricité de France,
CIH, Centre d'ingénierie hydraulique,
Savoie Technolac,
73373 Le Bourget Le Lac Cedex
francois.delorme@edf.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- BATJES, J.A., 1974, Surf similarity, in : *Proc. 14th Coastal Eng. Conf.*, p. 466-480.
- CFBR, DEGOUTTE, G., coordonnateur, 1997, *Petits barrages : recommandations pour la conception, la construction et le suivi*, Comité français des grands barrages, co-édition Cemagref Éditions-ENGREF, 173 p.
- CIGB, 1993, *Barrages en remblai, Protection du talus amont*, bulletin n° 91.
- FRITZ, H., 2003, *Initial Phase of Landslide Generated Impulse Waves*, ETH n° 14-871, PhD of Swiss Federal Inst. Techn., Zürich.
- GRILLI, S. T., SVENDSEN, I. A., SUBRAMANYA, R., 1997, Breaking criterion and characteristics for solitary waves on slopes, *Journal of Waterways Port Coastal And Ocean Engineering-ASCE*, n° 123, p. 102-112.
- PEYRAS, L., MÉRIAUX, P., 2009, *Retenues d'altitude*, Éditions QUAE, 352 p.

► Consulter l'ensemble des références
sur le site de la revue www.set-revue.fr



Retenue d'altitude soumise à un risque torrentiel.