Note hydraulique : Justification de la revanche et dimensionnement du déversoir de crues

Cette note a pour but de définir la revanche et dimensionner le déversoir de crues selon les recommandations Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR).

1 Hauteur de la revanche

1.1 Définition et méthodologie

Selon les recommandations du Groupe de Travail « Dimensionnement des évacuateurs de crues de barrage » rédigé par le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR), la revanche est dimensionnée à partir de critères sur la hauteur des vagues.
Il est considéré une revanche pour la côte des plus hautes eaux (PHE) et une revanche pour le niveau nominal d'exploitation.

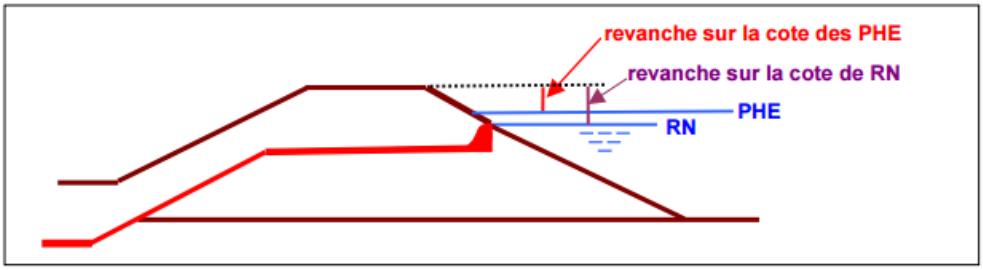


Figure 4.3 – Revanche sur les PHE ou sur la RN pour un barrage non équipé d'un mur pare-vagues

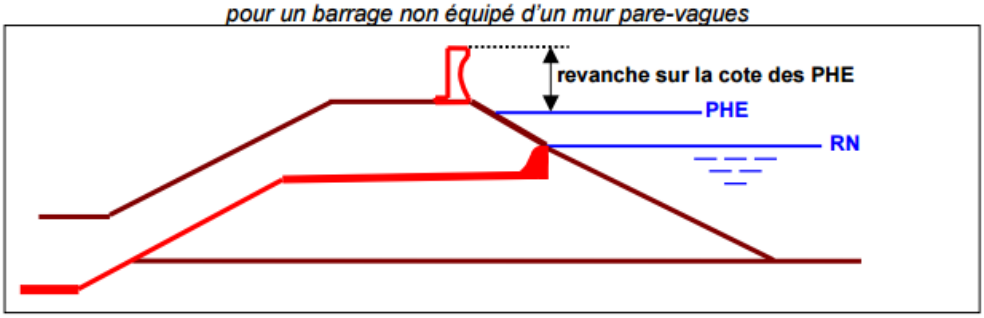


Figure 4.4 – Revanche sur les PHE pour un barrage équipé d'un mur pare-vagues

La revanche PHE doit correspondre à minima à la vague produite par un vent de période de retour 50 ans pour un niveau d'eau dans la retenue correspondant aux PHE.
La revanche Niveau nominal correspond quant à elle à la vague produite sur la retenue par un vent de période de retour 1000 ans.
Dans les deux cas, l'estimation de la revanche est réalisée en 4 étapes :

- Estimation du vent,
- Estimation de la hauteur des vagues sur le plan d'eau,
- Calcul de la vague projet,
- Détermination de la hauteur de déferlement.

1.2 Revanche – niveau PHE

1.2.1 Estimation du vent

Les données vent ont été recherchées auprès de Météo-France. Une station météo existe à Plagne Centre depuis 1970. Les données vent disponibles sont la direction du vent et la vitesse du vent horaire. Le pas de temps de cette donnée n'est pas suffisamment petit au regard des phénomènes en jeu qui sont à l'échelle de la minute voire quelques minutes.

Une hypothèse de vent de période de retour 50 ans à 150 km/h est retenue pour cette zone située en retrait du Col de Forcle.

Il existe par ailleurs des cartes de vent (Eurocode) à l'échelle nationale découpant le territoire en 4 zones de vitesses de vent de 22 à 28 m/s soit (80 à 100 km/h). Cependant ces données, ne peuvent être utilisées car ne permettent pas une juste représentation des vents au niveau du site compte tenu du contexte géographique (secteur montagne avec vents d'altitude). On note simplement que la valeur retenue est largement supérieure à ces valeurs de référence.

1.2.2 Estimation de la hauteur des vagues sur le plan d'eau

1.2.2.1 Formule de base

Le Comité Français des Barrages et Réservoirs recommande d'estimer la hauteur de vague significative, c'est-à-dire la hauteur moyenne du tiers supérieur de toutes les vagues du spectre. Dans le cas de conditions d'eau profonde, il est proposé d'utiliser la formule de Smith et al. (1991) :

$$H_s = 0{,}00048 * \hat{U}_a * \sqrt{F}$$

Avec :

- H_s : la hauteur spécifique des vagues en m,
- F : la longueur du Fetch de la retenue en m

La retenue de Forcle présente un fetch de 240 m pour le niveau PHE.

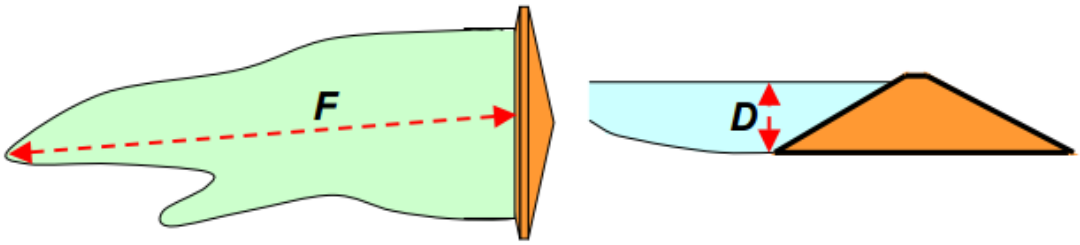


Schéma présentant la longueur du fetch et la profondeur d'eau de la retenue

- $\hat{U}_a$: la vitesse efficace ajustée du vent à 10 m du sol en m/s, soit :

  $$\hat{U}_a = U_a * \cos\theta$$

  Avec θ l'angle entre la direction du vent et des vagues et : $U_a = U * \sqrt{(0{,}75 + 0{,}067 * U)}$

  U étant la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol au dessus de la surface de l'eau pour une période de retour donnée. N'ayant pas d'information sur la direction des vents, on considère pour la suite que : $\hat{U}_a = U_a$ (hypothèse maximaliste).

1.2.2.2 Corrections à apporter

La formule de Smith et al. (1911) fait intervenir le vent à la surface de l'eau. Les données de vent provenant de stations terrestres, une correction est établie par un coefficient de majoration (Saville et al. 1962).

Longueur du Fetch (m)	Majoration
100 m	1,01
500 m	1,06
1000 m	1,1
5000 m	1,2

Majoration de la vitesse U du vent selon la longueur du Fetch

Une majoration d'1,028 est considérée compte tenu d'un fetch de 240 m.

Une seconde correction est à apporter à cette formule pour obtenir la hauteur de vague maximale compte tenu de la longueur du Fetch. Pour cela, il est nécessaire d'estimer la durée minimale du vent (t_{min}) nécessaire à la formation des vagues. Elle correspond à la durée à partir de laquelle les hauteurs des vagues sont limitées du fait de la longueur du Fetch.

Il est proposé par le Cfbr un calcul itératif basé sur les formules de Smith et al. 1991 et USACE, 1984 permettant d'obtenir une période de retour donnée : t_{min}, U_{tmin} : vitesse du vent d'une durée t_{min}, $\hat{U}_a$ la vitesse efficace du vent sur une durée t_{min}.

$$t_{min} = 27 * F^{0,72} * \hat{U}_a^{-0,44}$$ Smith et al. (1991)

Si t_{min} < 3600 s, $$\frac{U_{tmin}}{U_{3600}} = 1,277 + 0,296 * \tanh\left(0,9 * \log\left(\frac{45}{t_{min}}\right)\right)$$

USACE (1984)

Si t_{min} > 3600 s, $$\frac{U_{tmin}}{U_{3600}} = 1,5334 - 0,15 * \log(t_{min})$$

Ces formules permettent d'obtenir :

- t_{min} = 187 s,
- Ut_{min}= 48 m/s (173 km/h),
- U_a= 96 m/s (347 km/h).

conduisant à une hauteur significative des vagues : **H_s=0,72 m**.

1.2.3 Calcul de la vague projet

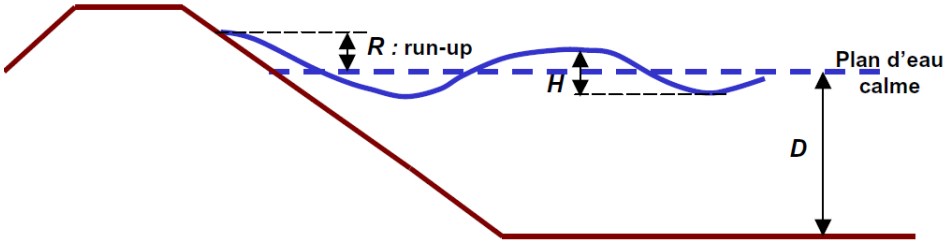
La vague projet dimensionnante dépend du pourcentage de vagues du spectre que l'on accepte de laisser dépasser la crête. Ce pourcentage dépend lui-même de la résistance des matériaux à l'impact des vagues.

Pour un barrage en remblai en terre, il est recommandé de considérer un pourcentage de 5 % de dépassement de la vague projet H_d soit une hauteur de vague projet H_d 1,25 fois la hauteur de vague significative (formule Saville et al., 1962).

Pour la retenue de la Forcle, on retient une hauteur de vague projet : **H_d=0,90 m**.

1.2.4 Détermination de la hauteur de déferlement

La dernière étape pour estimer la revanche réside dans l'estimation de la hauteur de déferlement R aussi appelé run-up. Ce paramètre dépend de la nature du barrage : pente du parement, nature des matériaux.



Hauteur de vague et hauteur de déferlement R

Pour estimer ce paramètre, il est utilisé la formule de Saville et al. (1962) donnant le déferlement relatif de la vague (rapport R/H_d) en fonction de la pente du talus et du ratio H_d/L.

L étant la longueur d'onde des vagues donnée par la formule :

$$L = 1{,}56 * T^2 \quad \text{valable si D(= profondeur d'eau) > L/2}$$

où T : la période du pic spectral des vagues est estimée par la formule de Smith (1991) :

$$T = 0{,}0716 * F^{0{,}28} * \hat{U}_a^{0{,}44}$$

Dans le cas d'un **parement lisse**, les valeurs de déferlement relatif R/H_d sont les suivantes :

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

Ces différentes formules et tableau conduisent aux éléments suivants pour la retenue de Forcle :

- L : longueur d'onde des vagues = 9,6 m,
- T : période du pic spectral des vagues = 2,5 m,
- H_d/L = 0,093,
- R/H_d = 1,48 (considérant une pente de talus amont de 1/2,5)
- R : hauteur de déferlement = 1,32 m (cas d'un parement amont lisse).

Dans le cas d'un barrage avec un parement amont rugueux comme c'est le cas pour la retenue de Forcle, les vagues déferlent de moins haut. Selon les publications de l'Institution of Civil Engineer (ICE, 1996) et le South African Committee on Large Dams (SACOLD, 1990), il peut être considérée une revanche (hauteur de déferlement) de 60 % nécessaire dans le cas d'un parement lisse.

Ces éléments conduisent à considérer une hauteur de déferlement donc une revanche de 0,79 m.

1.3 Revanche – Nnominal

La revanche Nnominal correspond à la vague produite sur la retenue par un vent de période de retour 1000 ans.
La méthodologie permettant d'estimer cette revanche est la même que celle pour la revanche relative au niveau des PHE.

En ce qui concerne, la donnée vent de référence, en l'absence de donnée, il est utilisé les indications ROSA 2000 permettant d'estimer un vent de période de retour donné à partir d'un vent de période de retour 50 ans :

$$\frac{V_T}{V_{50}} = \sqrt{\frac{1 - 0{,}33 * \ln\left(-\ln\left(1 - 1/T\right)\right)}{2{,}29}}$$

Soit :

Période de retour *T* (ans)	Facteur multiplicatif
5	0,81
10	0,87
20	0,93
50	1
100	1,05
200	1,10
500	1,15
1000	1,20
10000	1,33

Pour le cas de la retenue de Forcle, ces considérations nous amène à étudier un vent de 180 km/h comme vent de période de retour 1000 ans.

Estimation de la hauteur de vague significative

La hauteur de vague significative est estimée à 0,94 m. Les résultats des calculs intermédiaires conduisant à cette valeur sont récapitulés ci-dessous :

- t_{min} = 166 s,
- Ut_{min}= 58 m/s (210 km/h)
- U_a= 126 m/s (455 km/h).

Estimation de la hauteur de vague de projet

Tout comme pour l'estimation de la revanche dans le cadre d'un vent de période de retour 50 ans, on considère que 5 % des vagues peuvent dépasser de la vague projet. Une hauteur de vague projet de 1,17 m est retenue.

Détermination de la hauteur du déferlement

La hauteur de déferlement et revanche à considérer pour un vent de période de retour 1 000 ans et un niveau d'eau nominal dans la retenue est de 1,02 m. Les résultats des calculs intermédiaires conduisant à cette valeur sont récapitulés ci-dessous :

- L : longueur d'onde des vagues = 12,2 m,
- T : période du pic spectral des vagues = 2,8 m,
- H_d/L = 0,097,
- R/H_d = 1,44 (considérant une pente de talus amont de 1/2,5).
- R : hauteur de déferlement = 1,69 m (cas d'un parement amont lisse) ;
- R : hauteur de déferlement = 0,6*1,69=1,02 m (cas d'un parement amont rugueux).

1.4 Conclusion

L'étude des vents a permis de mettre en évidence les éléments suivants :

- Pour un vent de période de retour 50 ans et un niveau d'eau dans la retenue correspondant aux PHE, la revanche nécessaire est de 79 cm.
- Pour un vent de période de retour 1 000 ans et un niveau d'eau dans la retenue correspondant au niveau d'exploitation (Nnominal), la revanche minimale nécessaire est de 1,02 m.

Les caractéristiques de la retenue sont les suivantes :

- niveau nominal de la retenue : 2262,48 m,
- niveau des plus hautes eaux : 2262,68 m (cf. dimensionnement du déversoir de crues),
- niveau du sommet de la digue : 2263,50 m.

Il en résulte que la revanche prévue pour les PHE est de 0,82 m et celle pour le niveau nominal est de 1,02 m. Ces valeurs sont égales ou supérieures aux valeurs minimales préconisées par le Cfbr.

2 Dimensionnement du déversoir de crues

2.1 Définitions et méthodologie

Le déversoir de crues est dimensionné pour permettre la gestion des débits en situation exceptionnelle de crue et en situation extrême de crues.

La situation exceptionnelle de crue correspond à la crue conduisant au niveau des PHE. Pour un barrage de classe C en terre, il convient de considérer une crue de période de retour 1 000 ans (selon le décrêt 2007-1735 du 11 décembre 2007 – cf. tableau ci-après).

	Barrages rigides	Barrages meubles
A	1000 à 3000	10000
B	1000	3000
C	300	1000
D avec V ≥ 50000 m^3	100	300

Nota : les recommandations du Cfbr n'ont pas été mises à jour depuis le décret de mai 2015, aussi c'est de le décret de 2007 qui prévoit pour déterminer la période de retour de l'évènement dimensionnant.

Le calcul de dimensionnement est réalisé sous les hypothèses suivantes :

- Possibilité de laminage par la retenue (hypothèse non considérée dans le dimensionnement initial par sécurité),
- Cote initiale dans la retenue correspondant à la cote maximale d'exploitation Nnominal,
- Evacuateur de crue fonctionnel (pas de prise en compte de dysfonctionnement qui pourrait diminuer son efficience).

La situation extrême de crue correspond à l'atteinte de la cote de danger. Cette cote de danger peut être atteinte dans le cas d'une crue de période de retour supérieure à la crue exceptionnelle ou dans le cas de dysfonctionnements des ouvrages de sécurité. L'évènement a considéré est de période de retour 10 000 ans le barrage étant de classe C :

Classe du barrage	Probabilité annuelle de dépassement
A[11]	10^{-5}
B	3.10^{-5}
C	10^{-4}
D avec V ≥ 50000 m^3	10^{-3}

La cote de danger correspond à la cote de l'étanchéité de l'ouvrage à savoir 30 cm en dessous du niveau de la digue dans le cas de la retenue de Forcle.

Pour cette situation, il est considéré les hypothèses suivantes :

- Possibilité de laminage par la retenue,
- Cote initiale dans la retenue correspondant à la cote maximale d'exploitation Nnominal,

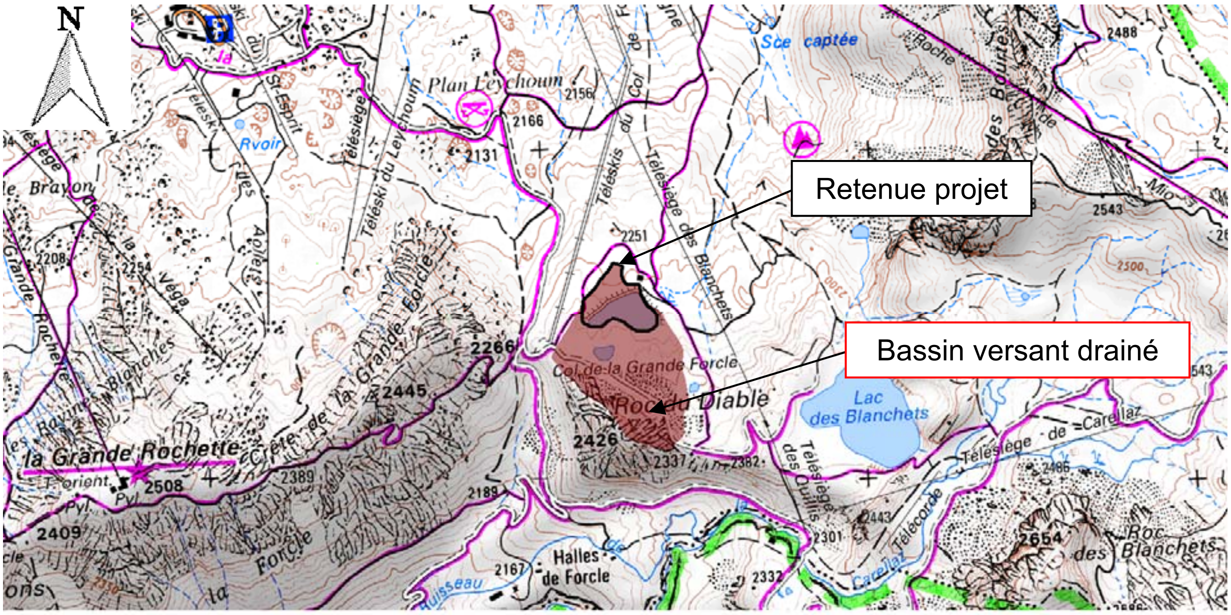
Le dimensionnement doit être réalisé pour les deux cas suivants :

- Fonctionnement nominal du déversoir de crues,
- Dysfonctionnement de l'évacuateur de crues.

2.2 Hydrologie du site

2.2.1 Bassin versant intercepté par la retenue

Le projet de retenue draine un bassin versant estimé à environ 15 hectares, comme dessiné sur la carte ci-dessous. Le bassin englobe le plan d'eau d'une surface de 3 ha environ.



Bassin versant de la retenue de Forcle

2.2.2 Définition des débits de crues caractéristiques

Il est proposé d'aborder les calculs des débits de crue par la méthode dite rationnelle en utilisant les coefficients de Montana de la station MétéoFrance de Bourg-Saint-Maurice. Une correction d'altitude est effectuée sur ces coefficients afin de prendre en compte la différence d'altitude entre Bourg-Saint-Maurice et la zone d'étude.
La méthode rationnelle permet de caractériser les débits de crues de petits bassins versant ruraux lorsqu'on connaît la surface totale du bassin versant, le coefficient de ruissellement équivalent et l'intensité de la pluie ramenée sur le temps de concentration.

$$Q = C_r \times I \times A/3.6$$

Avec :

- Cr coefficient de ruissellement ;
- I intensité de la pluie sur une durée t (mm/h) ;
- A surface du bassin versant (km²).

2.2.3 Evènements pluvieux considérés

2.2.3.1 Détermination du temps de concentration Tc

Cette méthode utilise le temps de concentration caractéristique du bassin versant drainant la retenue. Il s'agit de l'évènement pluvieux qui générera le débit le plus important.

Le temps de concentration est calculé à partir des formules de Giandotti et Passini adaptées pour des bassins versant ruraux. Il s'agit de formules empiriques dans lesquels des paramètres tels que la pente, la surface, la longueur du plus long chemin hydraulique du bassin versant sont pris en compte.
En appliquant un coefficient de 2 à la longueur hydraulique pour représenter la rugosité du bassin versant drainé par la retenue (soit 1,1 km au lieu de 0,55 km), il en résulte un temps de concentration de 14 min.

2.2.3.2 Evènements plus longs

L'objectif ici est le dimensionnement d'un déversoir de crue permettant de garantir quelque soit la crue un niveau en deçà ou égal de la cote des Plus Hautes Eaux (PHE).
Aussi, les débits de crues 10, 100, 1000 et 10 000 sont déterminés pour des durées différentes, pas seulement l'évènement qui générerait les débits les plus importants.
Conceptuellement, pour des durées courtes, les débits de pointe sont forts mais les volumes sont faibles, la retenue permet de jouer le rôle de tampon et écrêteur de crue. A l'inverse pour des crues longues, le laminage de la crue est quasi nul au regard des volumes en jeu mais les débits de pointe sont faibles.

L'analyse est menée sur 6 épisodes de durées différentes: 6 min, 15 min, 30 min, 1h, 2h et 3h. Le cas le plus défavorable (plus grand niveau d'eau dans la retenue) sera retenu comme crue de dimensionnement.

2.2.4 Détermination de l'intensité I

L'intensité est obtenue à partir des cœfficients de Montana. Les données pluviométriques les plus proches concernant les coefficients de Montana sont celles de la station de Bourg-Saint-Maurice pour la détermination des débits de retour 10 et 100 ans. Une correction d'altitude est faite sur les coefficients pour prendre en compte la différence d'altitude entre la station de Bourg-Saint-Maurice et la zone d'étude.

En appliquant la formule suivante : $\mathbf{I = a * T_c^{(-b)}}$

Pour le dimensionnement, une période de retour de 1000 ans est considérée. Aussi pour estimer l'intensité de l'évènement pluvieux dimensionnant (T=1000 ans), il est réalisé une extrapolation selon une loi de Gumbel à partir des valeurs décennales et centennales.

Pour les temps de concentration choisis précédemment, on trouve les intensités suivantes :

	t=6 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min	t=120 min	T=180 min
I10 (mm/h)	144	81	52	33	21	17
I100 (mm/h)	211	116	74	48	30	23
I1 000 (mm/h)	276	152	97	61	39	30
I10 000 (mm/h)	341	187	119	75	48	37

2.2.5 Estimation du coefficient de ruissellement

Selon la période de retour, le coefficient de ruissellement est plus ou moins important ce qui permet de traduire la saturation des sols.

On retiendra pour la partie prairie du bassin versant, les coefficients suivants :

- Crue décennale : 0,15 ;
- Crue centennale : 0,5 ;
- Crue cinq centennale : 0,6.
- Crue millénale : 0,8 ; Ce coefficient élevé permet de prendre en compte la saturation des sols pour des évènements rares et assure une sécurité sur les débits d'autant plus que le bassin versant peut-être partiellement enneigé en crue.

2.2.6 Détermination des débits de crue

Par application de la formule de la méthode rationnelle, nous trouvons les débits suivants pour les différents Tc testés :

	t=6 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min	t=120 min	T=180 min
Q10 (m^3/s)	2,02	1,13	0,72	0,47	0,30	0,23
Q100 (m^3/s)	5,44	3,01	1,92	1,23	0,78	0,60
Q1000 (m^3/s)	14,58	5,46	3,48	1,80	1,41	1,08
Q10 000 (m^3/s)	14,58	8,00	5,08	2,71	2,05	1,57

2.3 Dimensionnement du déversoir de crue

2.3.1 Méthodologie

Pour le dimensionnement, il est considéré que le niveau d'eau dans la retenue au moment de la crue est le niveau nominal c'est-à-dire que le niveau d'eau atteint la côte du déversoir.

Afin de dimensionner le déversoir il est considéré un modèle de type réservoir avec :

- En entrée : les apports du bassin versant de la retenue (crue Q1000 et Q10 000),
- En sortie : l'évacuation d'eau par le déversoir avec une efficience du déversoir à 90 % permettant de prendre en compte le phénomène de prise en glace,
- Réservoir : la retenue en elle-même.

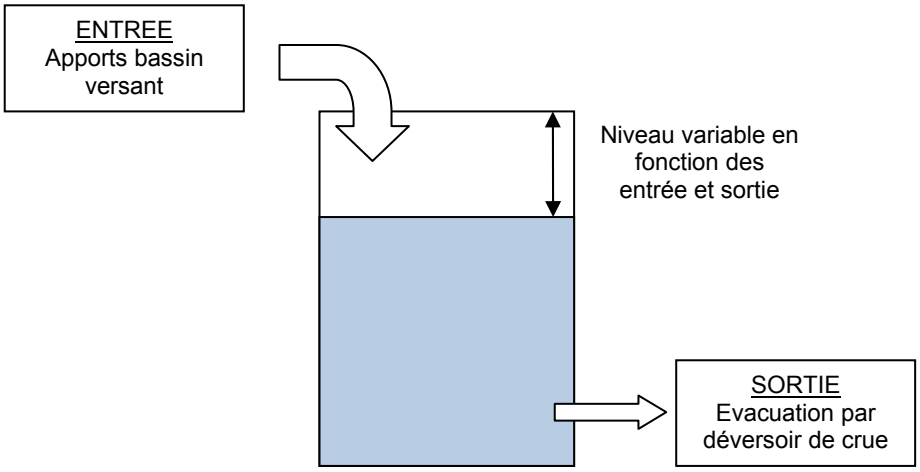


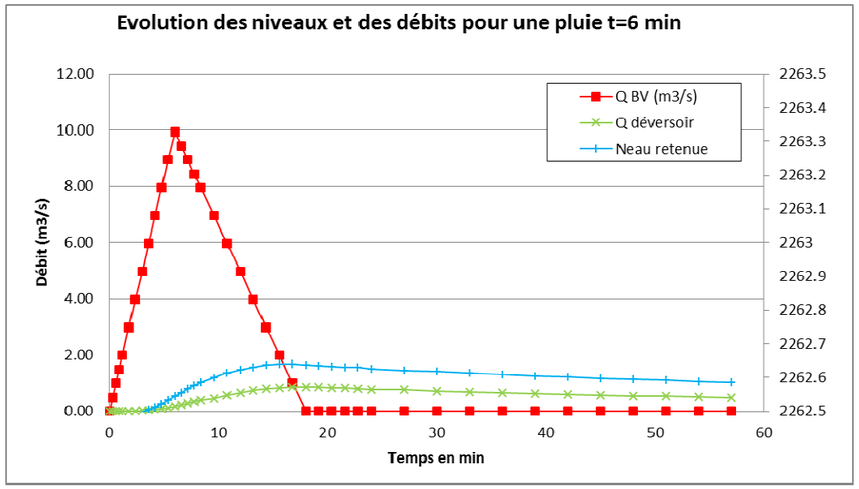
Schéma d'un modèle type réservoir

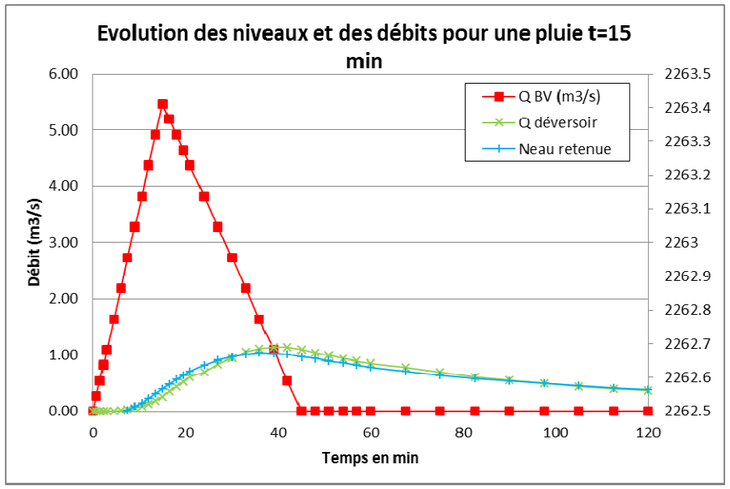
2.3.2 Résultats

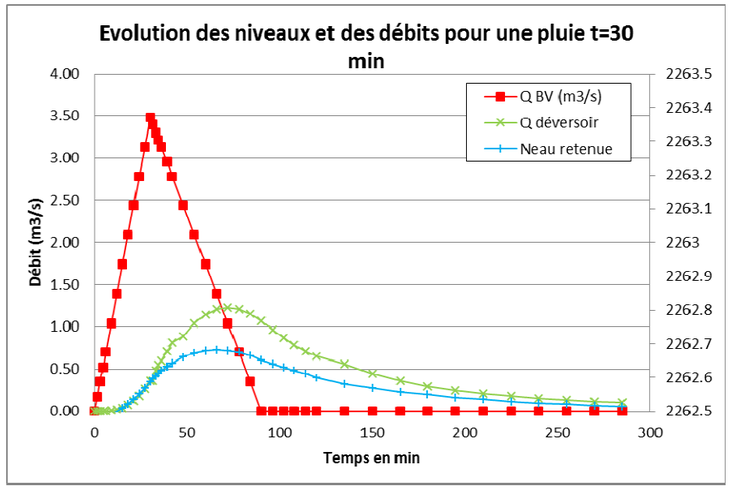
2.3.2.1 Situation exceptionnelle de crue (t=1000 ans)

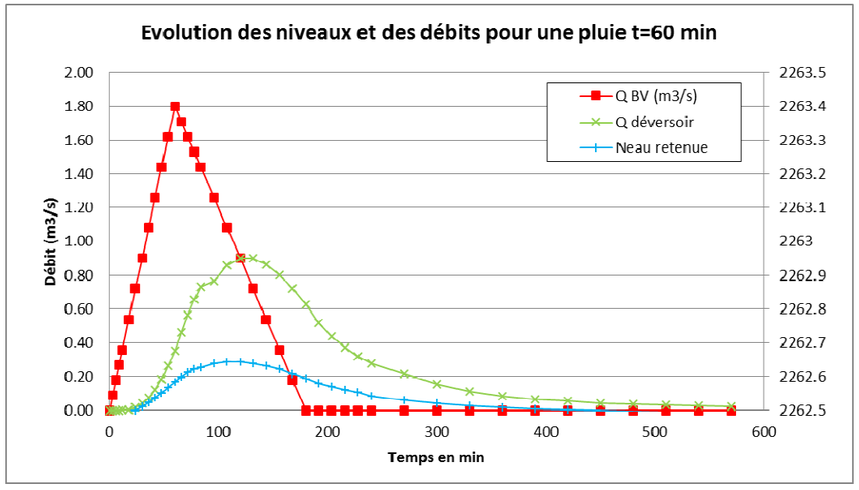
Pour une période de retour T=1000 ans, il est modélisé des pluies d'une durée de 6 min à 180 min sur la base des débits entrants, de la géométrie de la retenue et du déversoir. Le comportement du lac en est déduit à chaque pas de temps en faisant un bilan des débits entrants et sortants. L'analyse est réalisée sur la base d'une largeur déversante de 8 m et un niveau d'eau normal à la cote 2262,48 m. Le tableau ci-après récapitule pour chacun de ces évènements, l'élévation du plan d'eau induite. Suivent ensuite les graphiques correspondants.

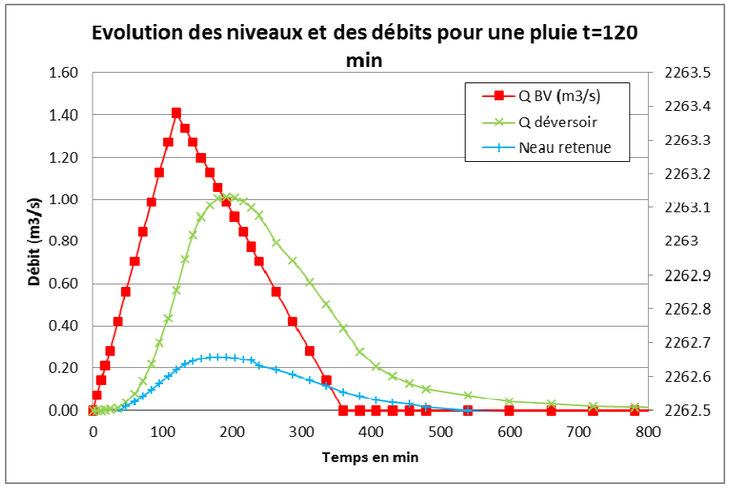
Durée crue	t=6 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min	t=120 min	T=180 min
Elévation plan d'eau (m)	0.159	0.192	0.203	0.164	0.178	0.161
Altitude du plan d'eau (m)	2262.64	2262.67	2262.68	2262.64	2262.66	2262.64
Qmax déversoir (m^3/s)	0.860	1.131	1.231	0.900	1.015	0.871

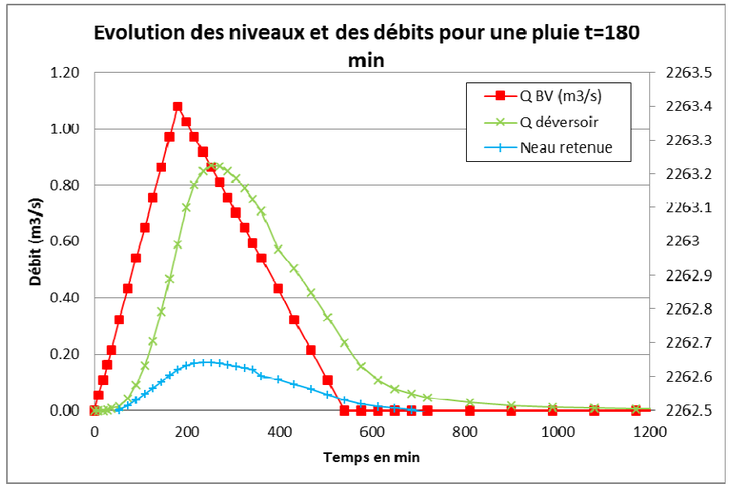












La crue dimensionnant est une pluie d'une durée de 30 min. Elle génère une élévation du plan d'eau de 20 cm correspondant à une altitude de 2262,68 m et un débit déversant au pic de crue de 1,23 m^3/s. La cote de la digue étant fixée à l'altitude 2263,50 m, la revanche est de 82 cm et respecte donc la revanche minimale de 79 cm définie dans la première partie de ce rapport (analyse du risque de vagues).

2.3.2.2 Situation extrême de crue (t=10 000 ans)

- **Fonctionnement nominal du déversoir**

Les résultats pour une pluie de retour 10 000 ans sont les suivants, en supposant un fonctionnement normal du déversoir (90 %) :

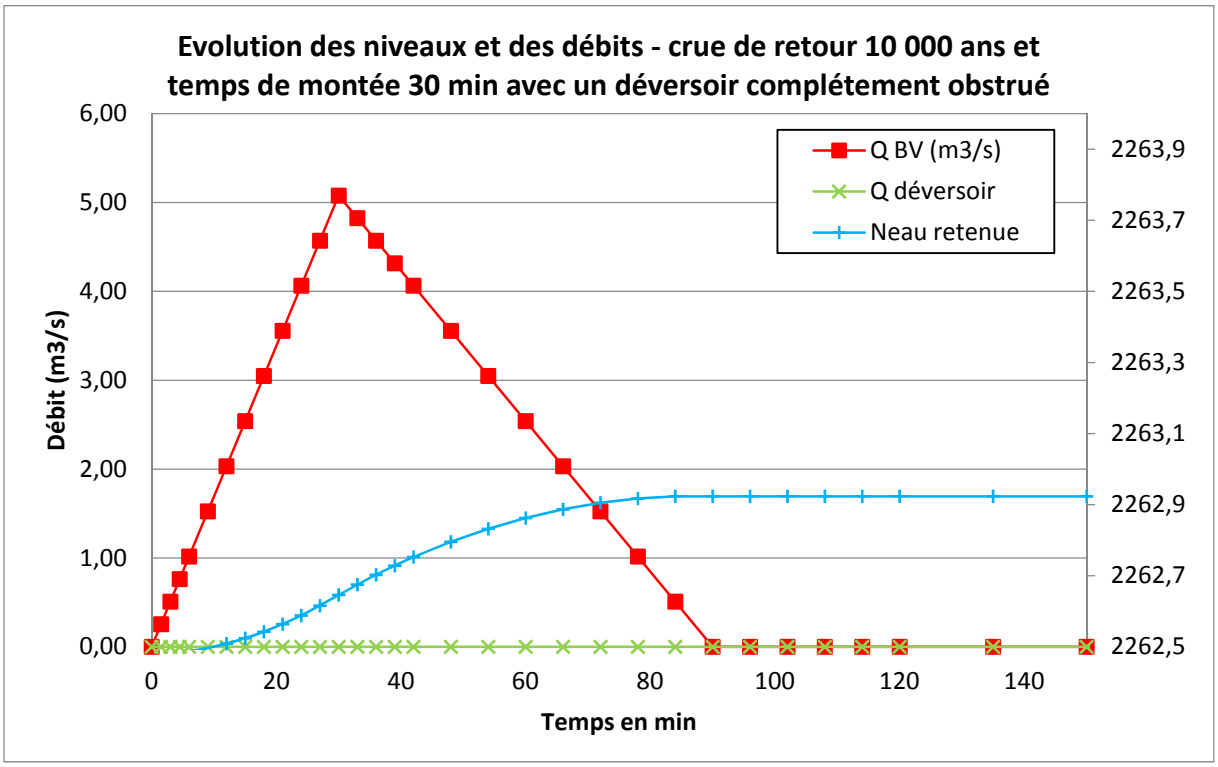
Durée crue	t=6 min	t=15 min	t=30 min	t=60 min	t=120 min	T=180 min
Elévation plan d'eau (m)	0.230	0.272	0.280	0.229	0.234	0.212
Altitude du plan d'eau (m)	2262.71	2262.75	2262.76	2262.71	2262.71	2262.69
Qmax déversoir (m^3/s)	1.482	1.896	1.983	1.473	1.517	1.313

La crue dimensionnant est une pluie d'une durée de 30 min. Pour un fonctionnement nominal du déversoir, elle génère une élévation du plan d'eau de 28 cm correspondant à une altitude de 2262,76 m et un débit déversant au pic de crue de 1983 l/s (ou 7139 m^3/h). La côté d'étanchéité de la retenue à 2263,20 m n'est pas atteinte dans ce cas.

- **Dysfonctionnement du déversoir**

On suppose dans ce cas un dysfonctionnement complet du déversoir (0%, pas de débit sortant) et le même évènement que précédemment à savoir une crue de retour 10 000 ans générée par une pluie d'une durée de 30 min. Le débit de pointe de la crue est de 5,08 m^3/s :

Temps de montée de la crue	t=30 min
Elévation plan d'eau (m)	0.444
Altitude du plan d'eau (m)	2262.92
Qmax déversoir (m^3/s)	0



Il apparait que la côte de danger n'est pas atteinte malgré le dysfonctionnement du déversoir. La retenue est capable de contenir le volume stocké par la crue sans que la côté d'étanchéité de la retenue ne soit atteinte.
Au regard de la petite taille du bassin versant, le dimensionnement du déversoir est réalisé sur la base de la crue exceptionnelle.

2.4 Dimensionnement du chenal d'évacuation

2.4.1 Radier

Le chenal d'évacuation de crue sera constitué d'un radier en enrochements bétonnés (2 couches de blocs) de forme trapézoïdale avec une largeur au fond de 3 m le long de la digue puis s'élargira à 5 m au fond en aval du remblai de digue en entrée de la fosse de dissipation.

La capacité du chenal a été estimée à l'aide de la formule de Manning-Strickler.

$$Q = K.S.R_h^{2/3}.\sqrt{i}$$

Avec :

Q : débit (m^3/s),
K : coefficient de Strickler
S : section hydraulique (m^2)
R_h : rayon hydraulique (m)

Une profondeur de chenal d'1 m permet de faire transiter le débit millénal déversant après prise en compte de la hauteur cinétique ($V^2/2g$).

2.4.2 Fosse de dissipation

Le chenal d'évacuation de crue se termine par une fosse de dissipation afin de dissiper l'énergie de flux et éviter l'érosion des terrains en aval.

Les différentes formules telles que Safranez, Certussoz ou en Sinniger et Hager conduisent à une longueur de bassin ou de ressaut hydraulique de 2 m environ. Par sécurité, on retiendra un bassin de 5 m de long ainsi qu'une surprofondeur de 50 cm.

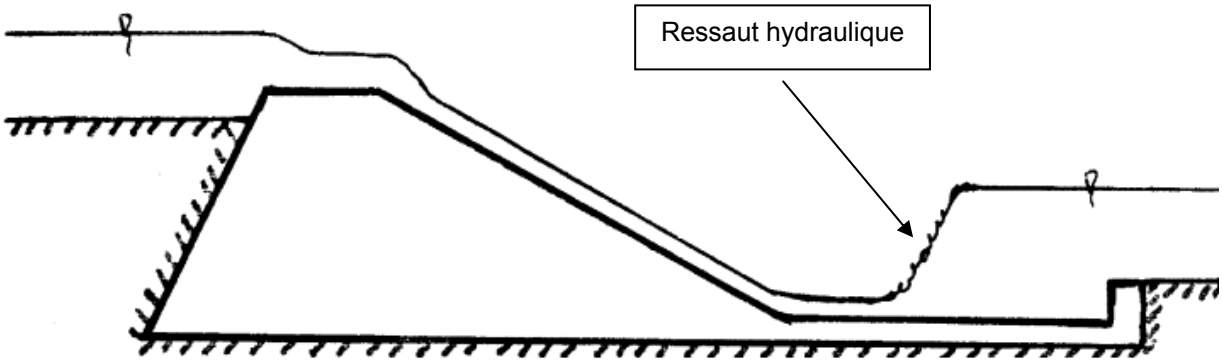


Schéma de la fosse de dissipation

A l'aval, le flux conservera une faible hauteur et vitesse. Les eaux iront rapidement dans le cours situé à proximité de la retenue.