

NORMES DES EVACUATEURS DE CRUE AU VIETNAM

Spillway design standards in Vietnam

Francis Fruchart

Compagnie Nationale du Rhône

2, rue André Bonin, 69316 LYON CEDEX 04

Tél: +33 (0)4 72 00 68 92 Fax: +33 (0)4 72 10 66 62, e-mail: f.fruchart@cnr.tm.fr

Robert Chauvet

Société du Canal de Provence et d'aménagement de la région provençale (SCP)

Le Tholonet, BP 100, 13603 Aix-en-Provence cedex 1, France

Tél: +33 (0)4 42 66 70 00, Fax: +33 (0)4 42 66 0 80, e-mail: robert.chauvet@wanadoo.fr

La période de retour de la crue de projet définie par les normes vietnamiennes, est fonction de la hauteur du barrage et du volume de la retenue, avec une division en 5 classes. Pour les gros barrages, ces normes sont assez voisines des normes françaises ou internationales. En revanche, les petits barrages sont eux protégés seulement pour des crues de période de retour faible. Ceci n'est théoriquement n'est pas illogique car la vulnérabilité est plus faible.

Pour la réhabilitation du barrage de Yen Dong que nous avons étudiée, selon ces normes, la période de retour de la crue de projet était très faible (cinquante ans) et ne nous semblait malgré tout pas acceptable. Le calcul du débit de projet déterminé à partir de la pluie, en zone karstique, semblait aussi sujet à incertitude. Nous sommes arrivés avec nos collègues vietnamiens à un compromis acceptable en termes de risque et de coût de l'ouvrage, en ajoutant une digue fusible, dans un lieu avec peu de vulnérabilité en aval, en complément de l'évacuateur de crue principal constitué d'un barrage gonflable. Quelques conclusions intéressantes concernant les risques peuvent être tirées du cas étudié.

Vietnamese standards define the design flood return period according to the dam height and to the volume of the reservoir, ranked in five classes. For high dams, Vietnamese standards are similar to French ones. On the other hand, small dams are only protected for low return periods. It theoretically appears logical, since the vulnerability is less. Regarding the Yen Dong dam rehabilitation, we had to study, and according to these standards, the return period to be applied was very low (fifty years) and finally did not seem acceptable to us. Computation of design flood from rainfall data, in karstic area, seemed also to be questioned. With our Vietnamese colleagues, an acceptable compromise has been found, in terms of risk and cost, by adding a fuse dyke, in a place with low downstream vulnerability, as a supplement to the main spillway (inflated rubber gate). This case allows to get out relevant conclusions about risk.

I INTRODUCTION

La CNR (Compagnie Nationale du Rhône), la SCP (Société du Canal de Provence) et le VNIWR (Vietnam Institute for Water Resources- Hanoi) sont intervenus en groupement au Vietnam pour un audit d'une quinzaine de projets hydrauliques dépendant du MARD (Ministry of Agriculture and Rural Development), géré par le CPO (Central Project Office). L'AFD (Agence Française de Développement) a participé au financement des études et travaux sous forme d'un prêt accordé au CPO. La mission a démarré fin 2004 pour s'achever fin 2008. Elle a consisté d'abord en l'amélioration des projets, puis le suivi des travaux. La plupart des projets concernait des protections de berges le long du Fleuve Rouge dont nous dirons quelques mots. Figurait aussi la réhabilitation du barrage de Yen Dong, objet de cette présentation.

Cet article ne constitue en rien une critique des normes vietnamiennes en matière de crue de projet. Au contraire, l'analyse de ces normes peut être mise à profit pour une réflexion intéressante sur les risques concernant les ruptures de barrage.

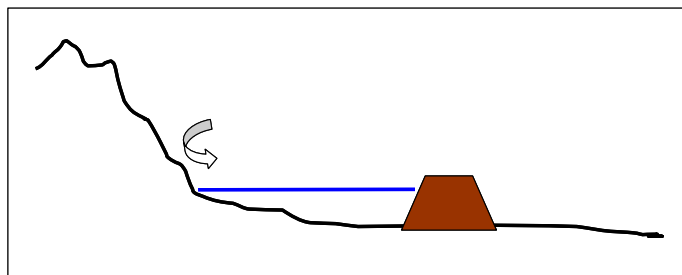
Quelques inexactitudes de traduction ou d'interprétation de la norme ont pu intervenir, du vietnamien en anglais, puis de l'anglais en français. Nous nous en excusons par avance.

II LE BARRAGE DE YEN DONG

II.1 Caractéristiques du barrage

Ce barrage est situé dans la province de Ninh Binh au sud de Hanoi. Construit en 1965, ce barrage à but de réserve pour l'irrigation et de protection contre les crues, est situé au pied nord des montagnes de l'Annam. Sa capacité est de 7,6 Mm³, après surélévation pour une hauteur maximale de digue de 6 m seulement.

Il présente une caractéristique singulière : afin d'intercepter un bassin versant maximal, la digue court parallèlement au pied des versants, très karstiques, et atteint une longueur de 9 840 m (figures 1, 2 et 3)



Il s'agit en fait d'un type astucieux et très ancien de retenue, provenant de la culture hydraulique ancestrale du peuple vietnamien, qui permettait d'éviter de construire un barrage sur le cours d'eau principal, tout en ayant une capacité de stockage importante pour l'irrigation.

Figure 1 – coupe en travers

La retenue de Yen Dong est en fait divisée en trois parties séparées par des seuils, la retenue centrale constituant l'essentiel du volume stocké. L'évacuateur de crue est situé au bout de la troisième retenue et déverse dans la rivière Cau Hoi.

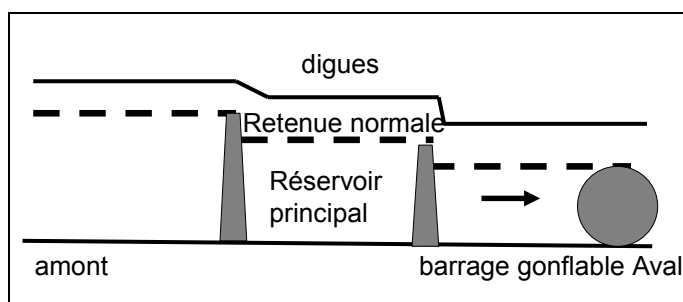


Figure 2 – le barrage de Yen Dong – profil en long

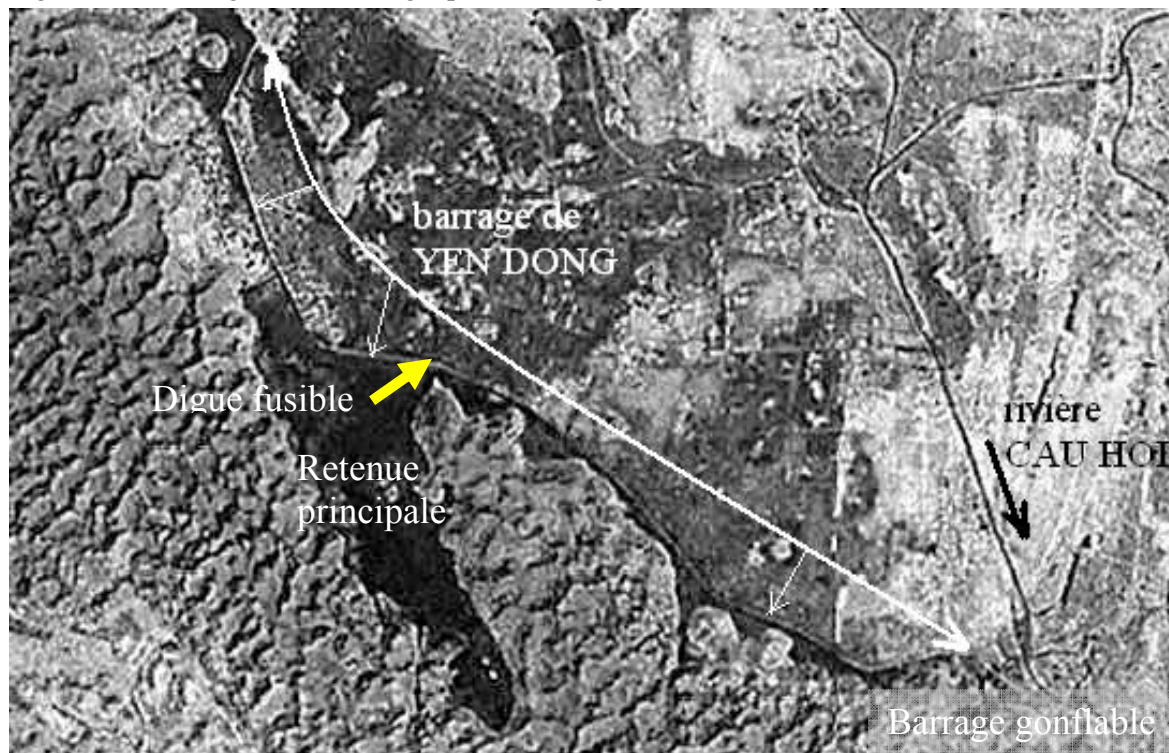


Figure 3 – le barrage de Yen Dong - vue aérienne

Une autre particularité importante est que les digues de berge de cette rivière sont calées seulement 1 m plus bas que celles du barrage.

Malgré l'ancienneté de la construction, il n'y a pas de données hydrologiques locales ; les seules disponibles proviennent de stations au centre de la plaine, à plusieurs dizaines de kilomètres du site. La crue de projet est alors calculée par une formule pluie-débit avec un coefficient de ruissellement standard, alors que le bassin est karstique, avec un comportement probablement bien spécifique.

Dès le premier examen du projet initial, il nous est apparu que les critères de sécurité concernant les capacités d'évacuation semblaient relativement faibles, compte tenu du volume stocké et de la situation dominant une vaste zone agricole avec plusieurs villages.

II.2 Les normes vietnamiennes en matière de projets hydrauliques.

Le projet initialement présenté s'appuyait sur les caractéristiques du barrage et se référait aux normes réglementaires vietnamiennes en matière de travaux hydrauliques, et plus particulièrement la norme 285:2002. En ce qui concerne les barrages, ce document définit 5 classes d'ouvrages en fonction du type et de la hauteur du barrage, de la nature de ses fondations et de sa capacité. Un extrait de cette classification est donné dans le tableau 1 ci-après. Puis la norme définit les crues de projet et de sûreté pour chaque classe. Celles-ci sont présentées dans le tableau 2 suivant.

Classes :

Type d'ouvrage	Qualité des fondations	Classes de projet				
		I	II	III	IV	V
1. Earth-rockfill dam Barrage en terre ou enrochements, d'une hauteur de: (en m)	A	> 100	100 << 70	70 << 25	25 << 10	≤ 10
	B	> 75	75 << 35	35 << 15	15 << 8	≤ 8
	C	> 50	50 << 25	25 << 15	15 << 8	≤ 8
2. Concrete dam Barrage en béton et autres, d'une hauteur de: (en m)	A	> 100	100 << 60	60 << 25	25 << 10	≤ 10
	B	> 50	50 << 25	25 << 10	10 << 5	≤ 5
	C	> 25	25 << 20	20 << 10	10 << 5	≤ 5
3. Wall dam d'une hauteur de : (en m)	A	> 40	40 << 25	25 << 15	15 << 8	≤ 8
	B	> 30	30 << 20	20 << 12	12 << 5	≤ 5
	C	> 25	25 << 18	18 << 8	8 << 4	≤ 5
4. Capacité en Mm ³		> 1000	1000 << 200	200 << 20	20 << 1	≤ 1

Tableau 1 - classes de barrage (norme vietnamienne TCXDVN 285-2002)

Les sous classes A B C représentent la qualité des fondations :

- A rocher
- B sable, argile rigide ou semi rigide
- C argile plastique saturée

Les chiffres en gras pour les barrages en béton indiquent une valeur différente des barrages en terre.

Un barrage en béton n'ayant pas de fondation en rocher (classes B et C) se voit souvent surclassé d'une catégorie par rapport à un barrage en terre ou en enrochement. Par exemple, un barrage en terre de 60 m de haut, sous classe B, donc catégorie II, passe en catégorie I, s'il est en béton.

Le cas 3 (wall dam) est plus restrictif, mais nous n'avons pas saisi à quel type de barrage il s'applique exactement.

La capacité du réservoir intervient aussi. Ainsi, avec réservoir de 300 millions de m³, le barrage se voit attribuer la classe II, même s'il ne fait pas la hauteur voulue.

Crue de projet

Type d'ouvrage	Fréquence de la crue de projet				
	I	II	III	IV	V
Ouvrages principaux					
- crue de projet: fréquence en %	0,1 - 0,2 %	0,5 %	1 %	1,5 %	2%
soit période de retour en années :	1000 – 500 *	200	100	67	50
- crue de sûreté: fréquence en %	0,02 - 0,04 %	0,1 %	0,2%	0,5%	
soit période de retour en années :	5000 – 2500 *	1000	500	200	

Tableau 2 - crues de projet selon les classes (extraits de la norme vietnamienne)

* Selon la norme : La plus petite fréquence est applicable aux ouvrages avec des crues complexes, soit généralement en montagne ou moyenne montagne. La plus grande fréquence est applicable aux barrages avec des crues normales, soit généralement en plaine.

La crue de sûreté est la crue maximale que doit passer l'ouvrage, c'est à dire sans revanche de sécurité.

Commentaires

Les normes vietnamiennes pour les gros barrages (classe I), a priori situés en montagne, sont en fait très voisines des normes françaises en terme de risque, puisque l'ouvrage est conçu pour la crue millénale, et cinq-millénale sans revanche.

La différence se fait sur les ouvrages de faible hauteur et faible volume de retenue, classe IV et V en particulier, qui concernent quand même des ouvrages pouvant atteindre jusqu'à 25 m de haut et 20 millions de m³ (classe IV), même si en général les valeurs sont plus faibles. La crue de projet et la crue de sûreté, sont alors calculées avec des périodes de retour plus faibles. Ceci n'est pas a priori choquant d'un point de vue logique, comme on le verra chapitre III. Les petits barrages, s'ils cassent, produisent en effet moins de dégâts.

II.3 Application des normes au projet Yen Dong

Pour le projet Yen Dong, en se fondant sur la hauteur de digue (6 m), le projeteur avait retenu la classe V, soit la dernière et donc une crue de projet de période de retour de 50 ans seulement. La prise en compte du volume de la retenue 7.6 Mm³ permettait de passer en classe IV, ce qui à vrai dire ne changeait pas grand chose (crue de projet de période de retour de 67 ans, et crue de sûreté 200 ans soit 410 m³/s).

La crue de projet aurait été Q1000 (P=0.01%) et la crue de sûreté Q5000 (P=0.02%) selon les normes françaises, les recommandations de l'USBR ou encore celles de 'Design of small dams'.

II.4 Les améliorations proposées

Pour l'évacuateur principal, un barrage gonflable de meilleure sécurité de fonctionnement que des vannes était judicieusement proposé par nos collègues vietnamiens. La commande du barrage gonflable a été déplacée de la rive droite non accessible en crue, à la rive gauche pour raison de sécurité de fonctionnement.

Si l'on tient compte des incertitudes des données hydrologiques et du bassin versant karstique, des difficultés d'évacuation en cas de crues importantes avec une hauteur d'eau dans la rivière aval proche de celle de la réserve, et enfin des informations selon lesquelles la digue avait déjà connu trois ruptures en quarante ans, il est évident que la crue de projet retenue pour le projet initial était très insuffisante. Nous avons donc recommandé l'augmentation des capacités d'évacuation du projet.

La topographie ne permettant pas d'augmenter de façon économique la taille de l'évacuateur, nous avons proposé deux améliorations complémentaires :

- une augmentation de la revanche,
- la création d'un évacuateur supplémentaire ultime sous forme de digue fusible.

L'amélioration a donc porté tout d'abord sur le profil de la digue, en supprimant notamment un mur de crête mal fondé, remplacé par un remblai complémentaire et en augmentant la revanche de 0 à 0.5 m selon les zones.

Une digue fusible en sable et gravier a été proposée, située au niveau de la retenue intermédiaire représentant le volume principal. A l'aval de la digue fusible, la vulnérabilité est faible, il n'y a pas de villages et il existe un large canal d'irrigation limitant la submersion des zones agricoles en cas de rupture. Pour parfaire le dispositif, un recalibrage de ce canal est souhaitable. La section type de cette digue est donnée par la figure 4 ci après.

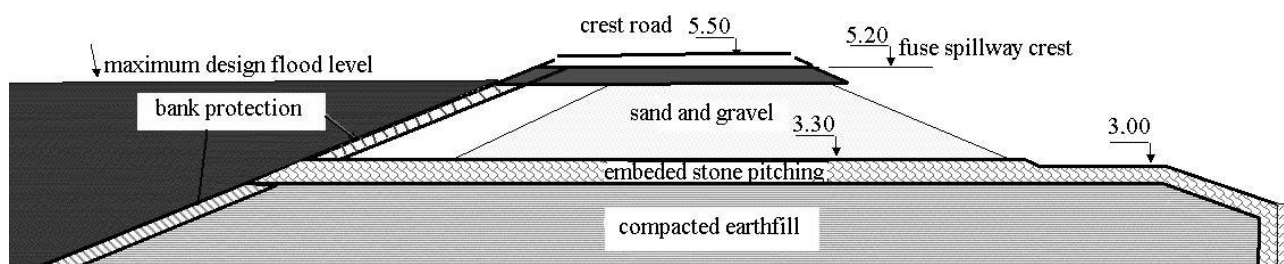


Figure 4 coupe de la digue fusible servant d'évacuateur de crue complémentaire

La longueur proposée de cette digue fusible est de 95m, permettant un débit supplémentaire non négligeable de 400 m³/s.

Ces améliorations ont été intégrées dans le projet définitif, et les travaux étaient en cours d'achèvement durant l'été 2008.

Avec l'évacuateur de crue principal et la digue fusible, il est maintenant possible de passer la crue de fréquence 1/500, avec une revanche par rapport à la crête de digue, ce qui n'annule certes pas le risque, mais le réduit sensiblement, sachant que la crue de projet initiale était Q50.

Concernant le calcul même de la crue de projet, le barrage étant à flanc de coteau, la mesure directe des débits des multiples mini affluents, voire des résurgences karstiques, n'est guère possible. Il a été conseillé d'effectuer des mesures sur les retenues: niveaux par limnigraphe, pluie et évaporation, comptage des débits sortant par l'évacuateur et par les prises d'eau agricoles. Le tout permettra d'établir un bilan hydraulique de la retenue, donnant accès aux débits entrant moyens disponibles pour l'agriculture, comme aux apports des crues extrêmes, permettant de recalculer plus précisément la crue de projet d'ici une vingtaine d'années.

II.5 Protection des digues contre les crues au Vietnam ¹

Les normes vietnamiennes énoncées ci-avant ne s'appliquent pas aux digues. Il est cependant intéressant de faire un aparté sur ce sujet, car les digues constituent le long du Fleuve Rouge de véritables barrages en terre latéraux. Ces digues qui protègent les zones riveraines et entre autres Hanoi, ont un niveau suffisant pour supporter la crue de fréquence 1/200, assurant ainsi un assez haut niveau de sécurité. Elles sont situées à une distance respectable des berges du Fleuve Rouge, ce qui les protège d'une destruction par érosion. Des protections de berges et des digues intermédiaires constituent des premières lignes de défense. Il existe encore des parades: l'ouverture du barrage de dérivation de Van Coc, qui en réalimentant à l'amont d'Hanoi un ancien bras, la Dai River, soulage le Fleuve Rouge. Enfin en ultime secours, il existe en aval du grand barrage de Hoa Binh des digues fusibles, destructibles par explosif sur ordre des plus hautes autorités, ceci permettant la mise en action de larges zones de laminage de crue.

En crue, les digues stratégiques du fleuve Rouge sont surveillées 24h/24 par des guetteurs postés tous les quelques km. Ceux-ci parcourent en permanence les digues en vélo pour détecter la moindre défaillance.

On peut dire que le Vietnam, avec une organisation sans faille, est un des pays dans le monde qui maîtrise le mieux la gestion des crues et la surveillance des digues, et nombreux sont ceux qui pourraient s'en inspirer en terme de gestion des risques.

¹ Réduction de la vulnérabilité et notion de risque accepté, voir en complément: *Risques d'inondation dans le delta du fleuve Rouge. De la nécessité d'améliorer leur prise en compte dans le processus d'aménagement du territoire* Olivier Gilard, AFD, Revue Hérodote, n° 121, La Découverte, 2e trimestre 2006.

III REFLEXIONS INDUITES PAR CE PROJET

III.1 Définition du risque et application

Peut on prendre plus de risques quand le barrage est moins haut comme le prévoit les normes Vietnamiennes ?

On rappellera que : **Risque = Probabilité de l'événement x Vulnérabilité**

Si la crue arrive, la probabilité (ou aléa) devient certitude et la vulnérabilité s'appelle alors dégâts et morts.

En fait, la question ci-dessus est déjà mal posée, car risque est alors comme souvent, confondu avec aléa. Il faudrait mieux dire:

Peut-on considérer un aléa plus important quand la vulnérabilité est plus faible, par exemple à l'aval de petits barrages ? A priori, oui comme nous le montre l'exemple fictif suivant:

La crue indiquée est celle qui provoque la rupture du barrage (par simplification, les dégâts sont chiffrés en nombre de morts, mais pourraient l'être en montant des dégâts).

Exemple :	Crue	Nb de morts	Risque en nombre de morts par an en moyenne
Gros barrage :	1/1000	5000	5
Petit barrage	1/50	200	4

Malgré les apparences, c'est-à-dire la bien plus forte probabilité de la crue pouvant détruire le petit barrage, le risque pris par an pour le petit barrage est un peu inférieur à celui pris pour le gros barrage (4 au lieu de 5).

III.2 Risque par an et risque sur une longue période

Quel risque global prend-on sur une longue période ? Cinquante ans par exemple ?

La dénomination crue 1/50 'cinquantennale', 1/100 'centennale', 1/1000 'millénale'... est bien trompeuse.

Toutes ces valeurs ont l'air bien faible et conduisent à penser que l'on ne risque pas grand chose.

Or le risque est pris et repris chaque année !



Une excellente métaphore pour faire comprendre ce qu'est par exemple une crue décennale, est la roulette russe. La crue décennale correspond à barillet à 10 trous dont un bien sûr avec une balle. On joue et on recommence chaque année. Si l'utilisateur tombe sur la balle, on nomme un remplaçant qui prend le relais. La métaphore fonctionne bien car tout un chacun s'est déjà demandé s'il jouerait lui même à la roulette russe, en intégrant de plus les enjeux.

Le risque pendant N années est donné par le calcul bien simple suivant :

P	probabilité que la crue arrive par an
$A = 1 - P$	probabilité que la crue n'arrive pas par an
$B = A^N$	probabilité que la crue n'arrive pas en N années
$C = 1 - B$	probabilité que la crue arrive en N années

Exemple d'application : probabilité de voir la crue 1/50 dépassée :

par an	1/50	1 chance sur 50
en 10 ans	0.18	soit environ 1 chance sur 5
en 50 ans	0.64	soit 2 chances sur 3 *
en 100 ans	0.87	soit presque 9 chances sur 10

* ce qu'il faut se rappeler : probabilité crue de fréquence 1/N arrive en N années : 2 chances sur 3 environ

► En choisissant une crue de projet de faible période de retour, 50 ans par exemple, il faut donc bien avoir à l'esprit que celle-ci (ou plus en débit) a une très grande probabilité d'arriver sur une longue période.

► Même pour de gros ouvrages protégés contre la crue millénale, le risque pris en 100 ans (durée de vie plausible de l'ouvrage) est quand même de 1 chance sur dix de voir la crue dépasser la crue de projet.

III.3 Nombre d'ouvrages en jeu

Quel risque prend-t-on pour plusieurs petits barrages ?

Il y a dans tous les pays peu de gros barrages et beaucoup de petits. Si la crue de projet de fréquence 1/50 est choisie pour l'un des petits barrages, elle est aussi choisie pour les autres.

Le même calcul de probabilité peut être appliqué à M ouvrages :

$$D = B^M = A^{N \cdot M} \quad \text{probabilité que la crue n'arrive pas en N années sur M ouvrages}^1$$

$$E = 1 - D \quad \text{probabilité que la crue arrive sur au moins un des ouvrages en N années}$$

Exemple d'application: pour 20 petits barrages, probabilité de voir la crue 1/50 dépassée pour au moins un barrage:

par an	0.33	soit 2 chances sur 3
en 10 ans	0.02	soit 98 chances sur 100

La loi des grands nombres s'appliquant, ainsi pour 100 petits barrages, il faut s'attendre bon an mal an, à voir la crue 1/50 dépassée sur deux d'entre eux chaque année.

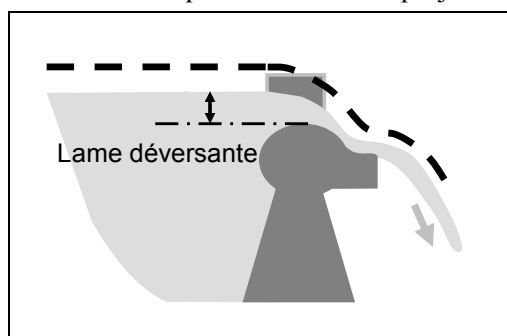
III.4 Au delà de la crue de projet

Que se passe-t-il au delà de la crue de projet ?

L'ingénieur a besoin de la valeur de la crue de projet pour ses calculs. Il se pose rarement la question de se qui se passe au delà, qui est pourtant une question primordiale en ce qui concerne les risques, puisqu'en deçà, il n'y a pas de risques de destruction de l'ouvrage et qu'au delà le risque commence.

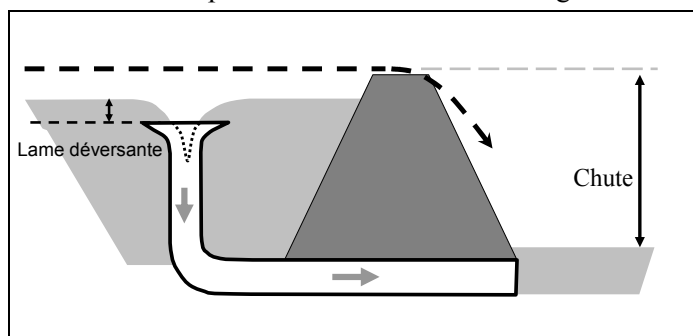
Prenons l'exemple d'un barrage écrêteur de crue, permettant d'éviter 400 morts pour la crue centennale, soit risque évité = $1/100 \times 400 = 4$ morts par an en moyenne ² (ici aussi par simplification, vulnérabilité exprimées en nombre de morts)

Supposons qu'on ait le choix entre un barrage en béton et un barrage en terre³, et regardons ce qui se passe en cas de crue dépassant la crue de projet et niveau de la retenue dépassant alors la crête du barrage:



Barrage en béton

avec évacuateur libre en crête



Barrage en terre

avec évacuateur tulipe (morning glory)

Hypothèse pour crue de projet (surface grisée): lame déversante 5m, revanche 2m, chute amont-aval 50m

En cas de niveau dépassant la crête du barrage (trait pointillé)

Lame déversante passe de 5 à 7m

Débit = $f(\text{lame déversante})^{3/2}$

Grosse marge de manœuvre: débit +60%

Crue très improbable et le barrage résiste

Risque ≈ 0 , pas de rupture ni dégâts

la tulipe passe en charge avec chute passe de 50 à 52 m

en charge débit = $f\sqrt{\text{chute}}$

le débit augmente de 2% seulement

le barrage casse, provoquant par exemple 50 000 morts

Risque = $1/10\ 000 \times 50\ 000 = 5$ morts par an en moyenne

¹ Sur des bassins versants hydrologiquement indépendants, donc suffisamment éloignés

² Les valeurs indiquées dans cet exemple, nombre de morts évités pour la crue centennale, nombre de morts en cas de rupture de barrage pour la crue décennale, ne sont pas prises au hasard, mais correspondent à un cas réel.

³ La géologie du site ne permettant souvent pas le choix entre barrage en béton et barrage en terre, on pourra supposer qu'il s'agit de deux barrages situés respectivement sur deux affluents à l'amont d'un même site à protéger, chaque barrage ayant la même efficacité d'écrêtement de la crue centennale.

Le résultat est édifiant, la rupture même très peu probable du barrage en terre présente un risque supérieur à celui qu'il est censé éviter pour la crue centennale. Le barrage en béton avec évacuateur libre ne présente pas ce risque de rupture.

► une bonne pratique est la suivante: ne pas laisser le hasard décider, même pour une crue peu probable dépassant la crue de projet.

C'est en fait ce qui été appliqué au barrage de Yen Dong. Si la crue dépasse la crue de projet, la digue est prévu pour casser à un endroit voulu où la vulnérabilité est la plus faible, et pas à n'importe quel endroit de la digue.

IV CONCLUSIONS

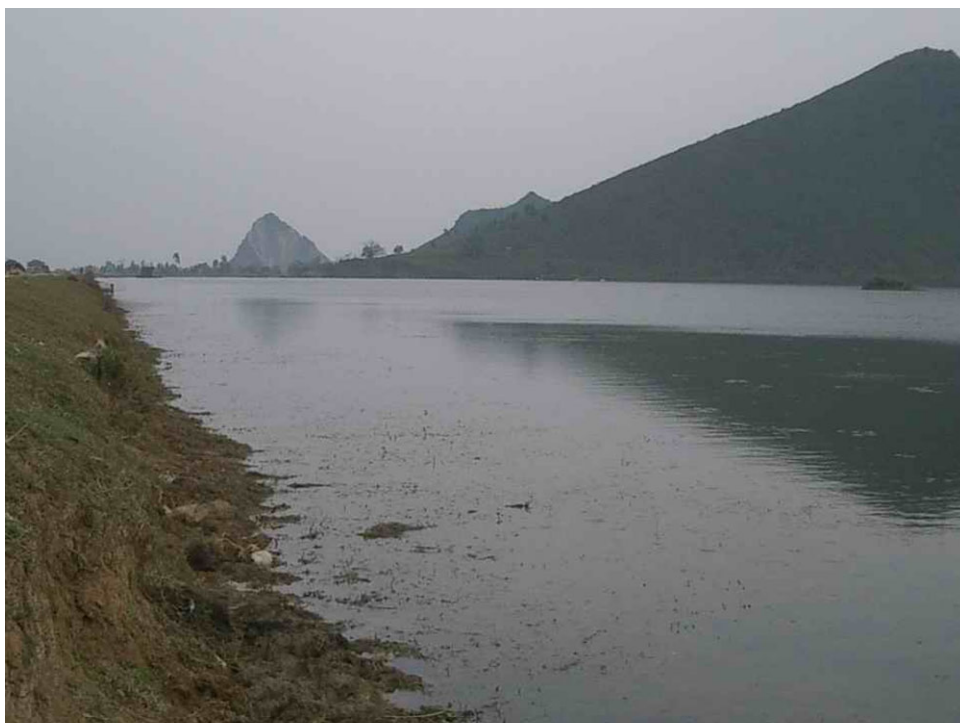
L'application des normes vietnamiennes au cas du barrage de Yen Dong de faible hauteur a conduit à une période de retour très faible pour la crue de projet. Ceci nous a obligés à regarder ce qui se passait au-delà et à proposer une solution : une digue fusible complémentaire à un endroit sans trop de vulnérabilité à l'aval.

Ce raisonnement peut être généralisé: Toujours regarder ce qui se passe au delà de la crue de projet, une solution pour minimiser les risques peut exister, et en tous cas, ne jamais laisser le hasard décider à votre place, optez pour la moins mauvaise solution.

Un des meilleurs moyens pour limiter les risques est de limiter la vulnérabilité par une urbanisation contrôlée, en tendant vers la notion de risque accepté.

V REMERCIEMENTS

Nous remercions les autorités vietnamiennes : Ministry of Agriculture and Rural Development (MARD) et leurs antennes régionales (DARD), le Central Project Office, les comités populaires, l'Agence Française de Développement (AFD) avec lesquels il a été agréable de collaborer dans un climat de confiance pour les différents projets étudiés, dont celui de la réhabilitation du barrage de Yen Dong.



Retenue principale - barrage de Yen Dong – avant travaux