

DETERMINATION DES COTES DE DANGER ET DES MODES DE DEFAILLANCE ASSOCIES : SYNTHESE SUR 65 BARRAGES EN BETON ET ILLUSTRATION POUR UN BARRAGE COMPOSITE

Assessment of failure threshold water levels (FTWL) and associated failure modes: review of 65 concrete dams and illustration for a composite dam

Samuel BALE, Marie CUBAYNES, Frederic LAUGIER
EDF CIH

samuel.bale@edf.fr ; marie.cubaynes@edf.fr ; frederic.laugier@edf.fr

MOTS CLEFS

Cote de danger, situation de danger, mode de défaillance, scénarios de rupture, barrage béton

KEY WORDS

Failure threshold water level (FTWL), failure threshold situation, failure mode, failure scenarios, concrete dam

RÉSUMÉ

Entre 2019 et 2023, EDF-CIH a réalisé environ 65 EDD de barrages en béton.

Cet article fait suite à l'article de 2019 [2] sur le concept de cote de danger (CDD), situation de danger et cote de vulnérabilité.

Il dresse un premier panorama, pour les barrages en béton, des estimations réalisées pour les CDD avec les modes de défaillance associés.

Une étude de cas d'un barrage composite complexe illustrera concrètement les concepts de situation de danger, cote de vulnérabilité de différents composants et détermination de la cote de danger, ainsi que les études d'ingénierie menées afin de déterminer ces données.

Le barrage est constitué d'une partie mobile avec quatre vannes segment sur seuils profilés et un clapet de surface, d'un barrage-usine et d'ouvrages de fermeture en rive.

La réévaluation des études hydrologiques a mené à une réévaluation importante à la hausse des débits de crue extrêmes. Face à ce constat, des études hydrauliques, structurelles et fonctionnelles (automatismes et procédures) ont été menées afin d'alimenter un addendum à cette EDD1, visant à mettre à jour les parties de l'analyse de risques concernées par le passage des crues.

L'article présentera les études de stabilité des vannes et du génie civil qui ont permis de déterminer les cotes de vulnérabilité des différents éléments, selon chaque situation de danger et chaque mode de rupture envisageable. En effet, s'agissant d'un barrage « composite » vanné avec des niveaux aval significatifs en crue, les différentes situations de défaillance des vannes et les différentes parties de l'ouvrage impliquent plusieurs « cotes de vulnérabilité » et non pas une cote de danger unique.

ABSTRACT

Between 2019 and 2023 EDF-CIH has undertaken approximately 65 Safety Review Risk Assessments (SaRRA) of concrete dams.

The present article follows up on the 2019 article [2] concerning the concepts of failure threshold water level (FTWL), failure threshold situations and vulnerability water levels.

It provides an initial overview of the estimations of FTWL for concrete dams, and analysis of the associated failure modes.

A case study of a complex composite concrete dam illustrates the application of the concepts of failure threshold situation, vulnerability water level for the different components and the estimation of the failure threshold water level, as well as the engineering studies undertaken to arrive at these estimations.

The dam is made up of a gated section with 4 profiled spillways equipped with radial gates, a flap gate, a powerhouse and a lateral concrete gravity section.

The re-evaluation of the hydrological study led to a significant increase in the estimation of the extreme flood flows. Faced with this situation, hydraulic, structural and functional studies were conducted to provide the data required for an addendum to the SaRRA 1 of the dam, the object of which was to update the parts of the risk assessment pertaining to flood discharge.

The article presents the structural analyses of the gates and the concrete components of the dam which allowed the estimation of the vulnerability water levels of the different components of the dam, according to different failure threshold situations and different failure modes. Indeed, the composite nature of the dam, with large flood gates and high downstream water levels in flood situations, implies different vulnerability water levels according to different accidental flood situations (failure of one or more gates to open), rather than a unique FTWL.

PROVIS

1. DEFINITION DE LA COTE DE DANGER (CDD) ET APPLICATION A EDF

L'arrêté de septembre 2018 [1] indique que l'Etude de Dangers (EDD) doit établir « au regard de la stabilité de l'ouvrage, la cote de danger, intrinsèque à l'ouvrage [...], c'est-à-dire la cote de retenue au-dessus de laquelle la stabilité de l'ouvrage n'est plus garantie. »

Ainsi, lors de chaque EDD, EDF-CIH définit une cote de danger comme la cote à partir de laquelle la stabilité du barrage n'est plus démontrée, sans coefficients de sécurité, dans le cadre d'un exhaussement de plan d'eau en crue.

De plus, lorsque la stabilité de l'ouvrage ne dépend pas que de la cote amont, mais d'une combinaison de paramètres comme la défaillance de vannes évacuateurs de crues et/ou la cote aval, sont alors définies une ou plusieurs situations de danger spécifiques à l'ouvrage. C'est notamment le cas pour certains Barrages Mobiles en Rivière (BMR).

L'analyse se conduit à travers deux grands types de modes de défaillance :

- Une défaillance liée à la surcharge hydrostatique déstabilisant l'ouvrage.
- Une défaillance liée aux effets d'une érosion aval des fondations ou appuis, pouvant provenir par exemple d'une surverse par-dessus la crête du barrage ou d'un contournement.

Contrairement à la première génération d'EDD réalisée entre 2007 et 2014 qui déterminait une cote de danger forfaitaire en fonction du type d'ouvrage (principalement rigides ou remblais), l'estimation des cotes de danger à partir de 2018 est faite au cas par cas et s'appuie notamment sur les éléments suivants :

- Données de conception, de réalisation et de maintenance,
- Identification de toutes les voies de contournement hydraulique possibles pouvant mettre en situation de danger tout ou partie de l'ouvrage,
- Historique de l'état et analyse du comportement,
- Retour d'expériences des événements exceptionnels sur l'ouvrage (comme les déversements notables),
- Etudes de cotes atteintes avec et sans défaillance de vannes,
- Etudes de stabilité du barrage, de ses parapets ...,
- Analyse du risque érosion lors de la surverse, du contournement...

Nota : La défaillance des organes de transfert (coursier) ou de dissipation d'énergie des crues entraînant la potentielle rupture du barrage n'entre pas dans la définition de la CDD du barrage. Cette défaillance est traitée à part dans l'analyse de risques.

2. CAS PARTICULIER DES BARRAGES COMPOSITES

Un barrage est dit « composite » s'il est constitué de plusieurs ouvrages majeurs indépendants (appelés « composants ») et juxtaposés, pour assurer ensemble une même fonction (retenir l'eau).

En pratique, on s'intéresse au caractère composite d'un barrage quand ses composants présentent des caractéristiques constructives suffisamment variées et indépendantes pour que la rupture de l'un puisse se produire sans entraîner la rupture des autres de façon simultanée. Seront ainsi différenciés les modes de défaillance et les cotes de vulnérabilité¹ de chaque composant. La cote danger de

¹ La cote de **vulnérabilité** répond à la même définition que la cote de danger mais est associée seulement à une partie de l'ouvrage (exemple : cote de vulnérabilité d'une vanne, cote de vulnérabilité du mur de fermeture ...).

l'ouvrage est alors la plus petite des cotes de vulnérabilité sauf si le composant est de taille mineure comparée à l'ouvrage et est traité à part, dans un ERC Spécifique.

Le cas d'étude présenté ci-après en est l'illustration.

3. REX DES CDD DES 65 BARRAGES BETON QUI ONT FAIT L'OBJET D'UNE EDD ENTRE 2019 ET MI-2024

Le graphe suivant présente la différence entre la Cote de Danger et le couronnement de l'ouvrage pour les 80 EDD V2 réalisées depuis 2019 à EDF (y compris les barrages en remblais en orange).

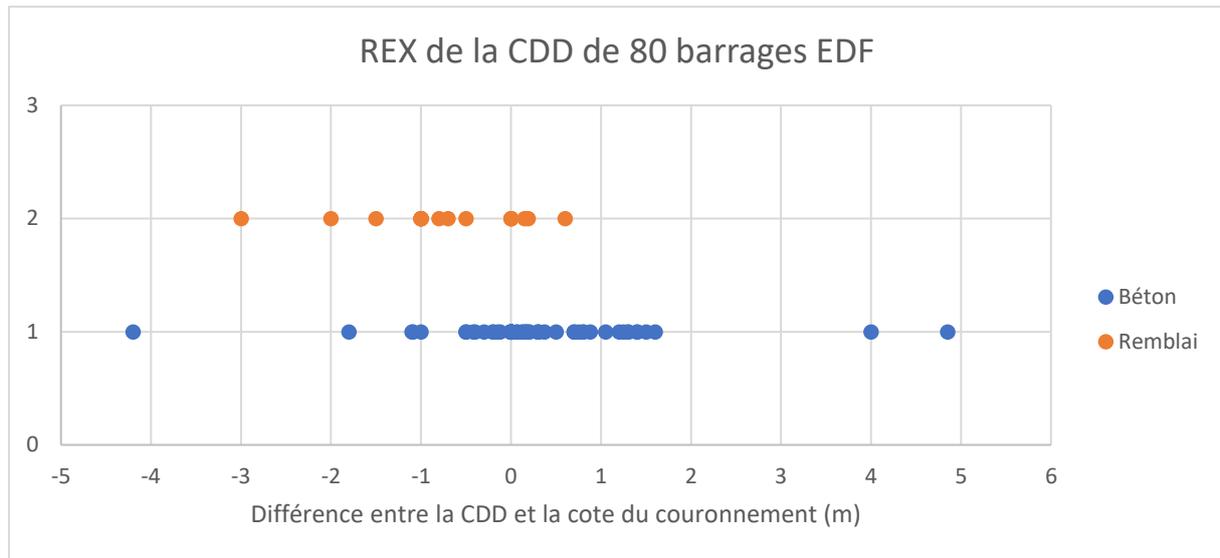


Figure 1. Différence entre la CDD et la cote du couronnement sur 80 barrages EDF étudiés entre 2019 et 2024.

En moyenne sur les 80 barrages, la CDD correspond au couronnement des ouvrages. Cependant, ce graphe permet de facilement illustrer que chaque barrage a sa propre cote de danger et que la forfaitisation appliquée aux EDDs de première génération a ses limites.

Pour les barrages en remblais, les différences sont moins importantes puisque que la CDD est souvent liée à la crête de l'étanchéité de l'ouvrage et que ces barrages sont très sensibles à la surverse.

Pour les barrages en béton, l'écart type est plus important et les modes de défaillance sont plus variés. La conception des ouvrages, la présence d'un parapet dont la stabilité est justifiée ou non, les zones d'introduction d'eau dans l'ouvrage avant l'atteinte du couronnement, ou encore les niveaux de surverse et de contournements sont autant de facteurs influençant la cote de danger.

Quelques barrages béton ont une cote de danger très éloignée du couronnement, comme le barrage à -4m qui s'explique par une conception du début du vingtième siècle dont le fruit du parement aval est très raide. A contrario d'autres barrages, par leur parapet robuste et leur géologie aval compétente par exemple, peuvent être justifiés à des cotes bien au-delà du couronnement.

Les paragraphes suivants dressent un premier panorama, pour les barrages en béton, des estimations réalisées pour les CDD avec les modes de défaillance associés en séparant barrages voûtes, barrages poids béton et Barrages Mobiles en Rivière (BMR).

3.1. Cas des barrages-voutes

Ces ouvrages sont souvent capables de reprendre d'importantes surcharges hydrostatiques (cas extrême du barrage de Vajont en Italie, ayant supporté une surverse de près de 200 m suite à un glissement de terrain). En cas de présence de culée-poids, cette dernière peut alors représenter le

maillon faible de la structure. Sinon, les problématiques de contournement hydraulique et d'érosion par surverse seront les probables facteurs dimensionnant la CDD. La CDD sera donc a minima égale à la crête du barrage. En cas de parapet plein assurant une fermeture hydraulique du barrage, la CDD sera fréquemment supérieure ou égale à la cote du parapet.

Pour certains barrages voûtes minces, particulièrement sensibles à la température, le chargement thermique peut atteindre un ordre de grandeur comparable au chargement hydrostatique. Un effet de saison est donc pris en compte dans la détermination de la cote de danger ; la CDD en hiver peut ainsi être significativement plus basse que la CDD en été.

En effet, sur 30 barrages voûtes étudiés entre 2019 et 2024 :

- 22 cotes de danger sont liées au phénomène d'érosion aval par surverse ou contournement,
- 4 sont liées à la stabilité d'une culée,
- 1 est liée au chargement thermique hivernal,
- 1 est liée à la mise en charge et rupture des parapets qui entraîne l'érosion par surverse,
- 2 sont liées au dépassement de la résistance du béton en pied amont.

Sur ces 30 barrages, 27 ont des CDD supérieures à la cote du couronnement de l'ouvrage.

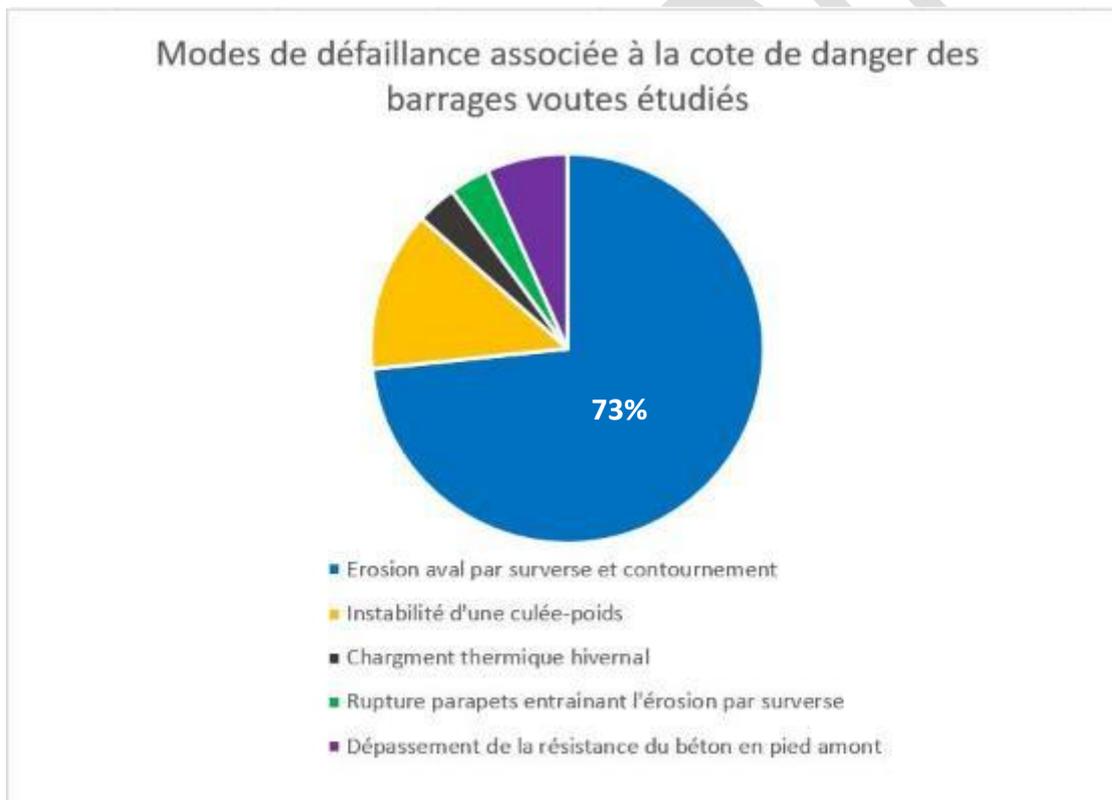


Figure 2 : Répartition des cotes de danger des barrages voûtes par types de modes de défaillance associés.

3.2. Cas des barrages poids-béton

Une vingtaine de barrages poids-béton « classiques » a été étudiée entre 2019 et 2023. Les trois raisons principales permettant de déterminer la cote de danger sont :

- Erosion par surverse et contournement,
- Limite de stabilité d'un plot poids,

- Introduction d'eau dans l'ouvrage entraînant une inondation ou une mise en charge de la galerie de drainage.

La moyenne des CDD se trouve au niveau du couronnement ; ainsi la cote de danger de ces ouvrages a majoritairement diminué par rapport à la première EDD (en effet, pour les premières EDD, la CDD était déterminée selon la pratique issue des PPI, à crête +1m pour une grande partie des barrages rigides, sans prendre en compte explicitement l'étude de stabilité ou les phénomènes d'érosion par surverse).

Les sept ouvrages qui présentent une cote de danger supérieure au couronnement (de + 20 cm à +1,3m) ont majoritairement un parapet qu'il est possible de justifier grâce aux plans d'ancrages et de ferrailages. Quatre ouvrages ne peuvent être justifiés de manière intrinsèque jusqu'au couronnement, particulièrement quand des orifices intégrés au barrage permettent une introduction d'eau importante dans la galerie de drainage (par l'amont, ou par l'aval lorsque le niveau augmente). Cependant, sur ces ouvrages, une intervention souvent simple suffit à éviter cette introduction d'eau (installation de portes étanches, réhausse du niveau des puits, obstruction d'une ouverture). Cette recommandation de l'EDD peut permettre, sous réserve des calculs de stabilité, de rehausser la CDD jusqu'au couronnement. Certains ouvrages conserveront une CDD inférieure au couronnement en fonction de leur sensibilité à l'augmentation des sous-pressions et à la charge hydrostatique par exhaussement du plan d'eau.

3.3. Cas des BMR

Pour des crues extrêmes, certains barrages mobiles en rivière ont des cotes amont et aval très proches et peuvent donc rester stables même à des cotes très élevées. Dans ce cas, la cote de danger peut ne pas exister.

Pour les autres, les situations de danger les plus pénalisantes, couplant des scénarios de défaillance de vannes avec une combinaison de cote amont et de cote aval, sont définies. L'étude de cas ci-dessous en est un exemple.

4. UNE ETUDE DE CAS D'UN BARRAGE COMPOSITE COMPLEXE SUR LE TARN

4.1. Présentation de l'ouvrage

L'ouvrage est un barrage de classe B situé sur la rivière Tarn à l'aval de Millau. Il est constitué, de la rive droite à la rive gauche, d'un barrage-usine, d'un barrage mobile équipé des 4 vannes segment constituant l'évacuateur de crues principal, d'une passe équipée d'un clapet de régulation de cote automatique et d'un plot de fermeture en rive gauche. L'ouvrage a été mis en eau en 1958 et est constitué de béton conventionnel vibré, armé pour les piles de la partie mobile et le barrage-usine.



Figure 3 : Vue aérienne de l'ouvrage (Google maps)

La hauteur sur fondation est de 24,5 m pour le barrage mobile et de 30 m environ pour la partie la plus enfoncée du barrage-usine. Les coupes type sur les différentes parties de l'ouvrage sont présentées dans les figures ci-après. La cote de la retenue normale (RN) est de 285 mNGF.

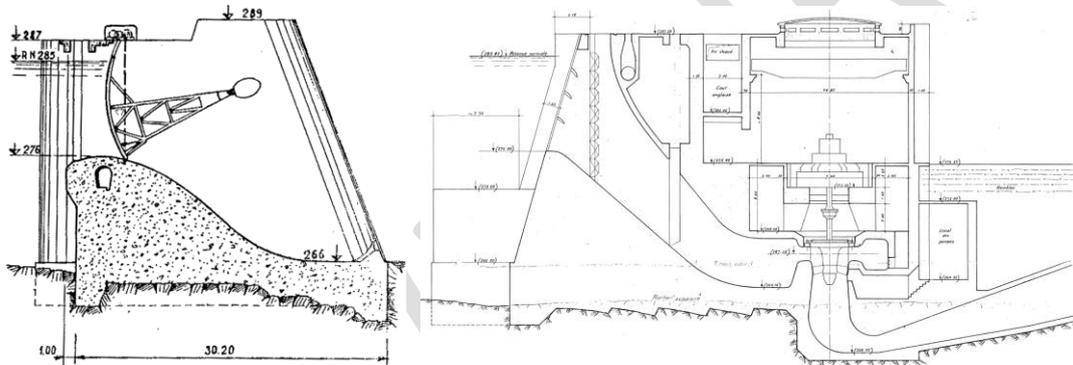


Figure 4 : Coupes sur le barrage mobile (à gauche) et barrage-usine (à droite)

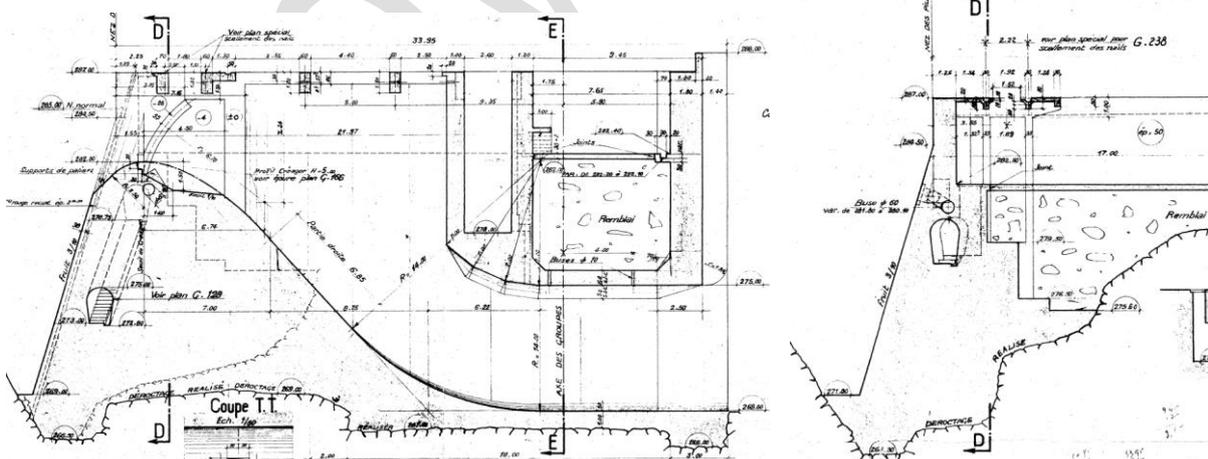


Figure 5 : Coupes sur le clapet de régulation (à gauche) et la fermeture en rive gauche (à droite)

4.2. Contexte

Le débit de crue pris en compte à la conception de l'ouvrage était de 3 500 m³/s (débit estimé de la crue maximale connue de 1875). Suite à une crue importante en 1982 (2 800 m³/s), une étude hydrologique a été réalisée par la méthode GRADEX. Publiée en 1985, cette étude a abouti à l'estimation d'un débit de crue de temps de retour 1 000 ans (Q₁₀₀₀) de 4 400 m³/s.

Des travaux ont été réalisés en 1989 / 1990 pour améliorer le passage des crues et permettre le passage de la crue millénaire sans contournement ou surverse de l'ouvrage. Ces travaux ont consisté notamment en :

- la reconstruction de la passerelle sur l'ouvrage à une cote supérieure (tirant d'air),
- la suppression des pilotis des batardeaux au centre des passes (gain de débitance),
- la modification des courses/sur-ouverture des vannes (tirant d'air),
- et la réalisation de parapets anti-crue au droit de l'usine et de la fermeture en rive gauche.

Un modèle hydraulique physique a permis de valider une capacité d'évacuation de 4 420 m³/s dans cette configuration, pour une cote amont de 287,80 NGF, soit 1,5 m au-dessus de la cote des plus hautes eaux (PHE) historique et 2,8 m au-dessus de la cote de RN.

Lors de la première EDD de l'ouvrage en 2010, l'étude hydrologique de 1985 a été invalidée par EDF-DTG (Division Technique Générale). Une nouvelle étude a été produite en 2011 selon la méthode SCHADEX. Cette étude a été ensuite mise à jour en 2019 pour tenir compte notamment de l'influence du terrain karstique à l'amont du bassin versant.

Le débit Q_{1000} a ainsi été porté à 7 000 m³/s. Cette forte augmentation a conduit à la réalisation d'un addendum à l'EDD 1, en anticipation de l'EDD 2 prévue en 2025, dont l'objectif était de mettre à jour l'analyse de risques pour la partie crue.

4.3. Débitance de l'ouvrage

La loi Hauteur / Débit (H/Q) aval a été déterminée à partir d'une modélisation hydraulique du Tarn en 2D (Télémac 2D). La cote atteinte pour le débit Q_{1000} est de 284,9 mNGF, soit environ RN et 2 m sous le toit du barrage-usine. La cote de la plateforme à l'aval du barrage usine (275 mNGF) est atteinte pour une crue de temps de retour 10 ans environ et le mur de protection de cette zone, relevé après la crue de 1982, (278 mNGF) pour un temps de retour de 50 ans environ.

La loi de débitance de l'ouvrage a été déterminée à l'aide d'une modélisation numérique 3D (Flow3D), calée, pour les débits jusqu'à 6 000 m³/s, sur les résultats du modèle physique réalisé dans les années 80.

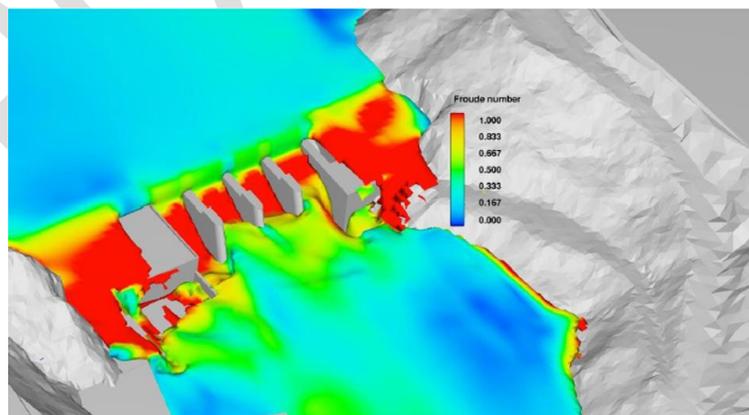


Figure 6 : Simulation du passage de crue pour une cote amont de 294 mNGF

Ce modèle a permis le calage des paramètres de lois analytiques adaptées à chaque partie de l'ouvrage, y compris pour des débits largement supérieurs au débit de dimensionnement des travaux des années 1989/90 (4 400 m³/s), débit qui désormais correspond environ à la Q_{100} . Les parties concernées sont :

- passes vannes segment avant et après mise en charge en position ouverte,
- passe clapet de régulation,

- vanne de fond barrage usine,
- surverse des piles,
- contournement / surverse barrage-usine et fermeture en rive droite.

Ces lois ont ensuite été modifiées pour tenir compte de l'influence éventuelle des corps flottants. Pour cela, les résultats des travaux de Walker et al [3] ont été exploités pour déterminer la réduction de débitance pour les passes équipées de vannes segments, après la mise en charge de celles-ci. En tenant compte du rapport entre l'ouverture sous la vanne et la charge sur le seuil, une réduction de débitance variant de 20 % à 25 % est appliquée de manière conservatrice (utilisation prudente de la courbe « artificial debris jam », obtenue par un bourrage manuel du pertuis sous la vanne du modèle), selon la charge.

Il en résulte une cote atteinte à l'amont du barrage de 294 mNGF pour le débit Q_{1000} (292,2 mNGF sans tenir compte des corps flottants).

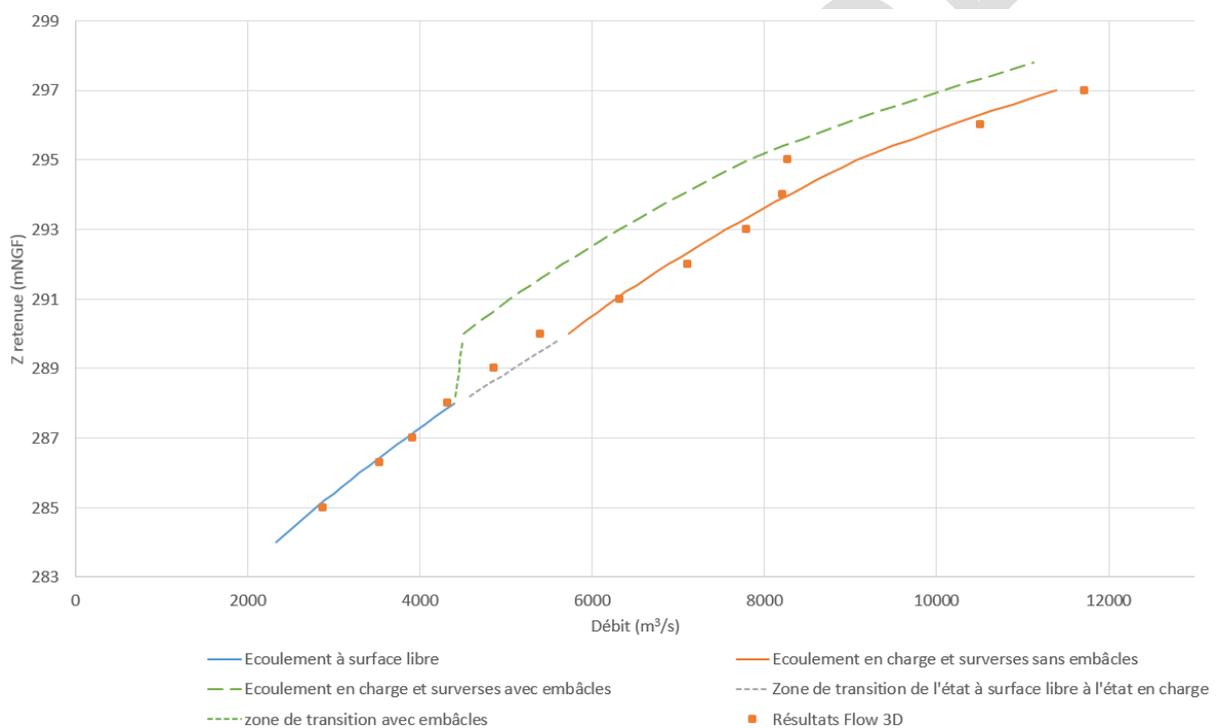


Figure 7 : Courbe de débitance globale de l'ouvrage en tenant compte de l'impact d'un éventuel embâcle de corps flottants

4.4. Définition des situations de danger et cotes de vulnérabilité

Comme indiqué aux §2 et §3.2, la définition d'une cote de danger peut être plus ou moins complexe selon le type d'ouvrage. En effet, pour un ouvrage dit « composite » comme l'exemple présenté, chaque partie de l'ouvrage peut avoir une cote « de vulnérabilité » (confer §2) différente. De même, pour un barrage mobile notamment, ces cotes de vulnérabilité peuvent varier selon différentes situations car la stabilité dépend du niveau amont, mais aussi du niveau aval. Ainsi, pour ce type d'ouvrage il est nécessaire de déterminer lors de l'analyse de risques les différentes situations pouvant amener à une ruine éventuelle de l'ouvrage ou d'une partie de l'ouvrage, au-delà de la situation de crue « nominale » où les organes d'évacuation de crues fonctionnent tel que prévu. Ces situations dépendent de la configuration et de l'architecture du génie civil, des organes mécaniques et du contrôle-commande de chaque aménagement.

Dans le cas de l'exemple présenté, les situations suivantes ont été examinées :

- la situation de crue « nominale »,
- non ouverture (ou fermeture intempestive) d'une vanne segment,
- et non ouverture (ou fermeture intempestive) des quatre vannes segments.

⇒ Ces deux dernières situations sont systématiquement à considérer pour les barrages vannés. Il peut aussi y avoir des situations de défaillance additionnelles en cas de modes communs pouvant affecter par exemple deux vannes à la fois.

Les études de stabilité des ouvrages génie civil et mécaniques (vannes) permettent ensuite de déterminer le débit, et donc le temps de retour, à partir duquel les critères de stabilité ne sont plus respectés. Pour les situations de défaillance, ce temps de retour est ensuite combiné avec l'occurrence de la défaillance estimée afin de déterminer l'occurrence globale de la rupture de l'élément concerné ; cette cotation correspond alors à l'occurrence de l'évènement initiateur : « exhaussement du plan d'eau jusqu'à la CDD/situation de danger ».

Ci-après, un exemple de construction de la partie de l'arbre permettant de faire apparaître les différents scénarios amenant à une cote de danger (sans défaillance de vannes, avec la défaillance d'une vanne évacuateur de crues et avec la défaillance de toutes les vannes si des modes communs sont identifiés).

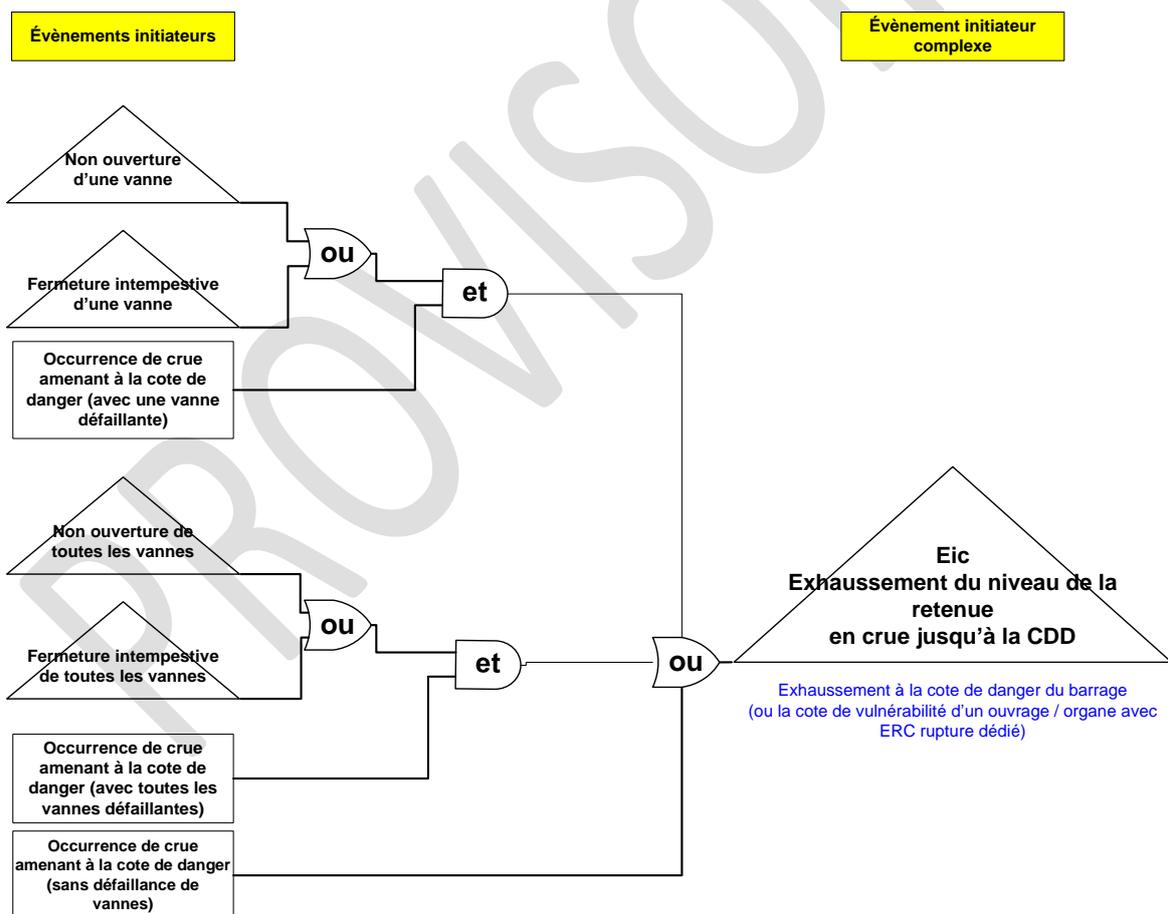


Figure 8 : Exemple de construction de la partie de l'arbre amenant à la cote de danger.

Résultats génie civil

Une recherche de la cote de danger a été menée pour chaque profil représentatif du barrage et pour les trois situations de crue retenues :

- fonctionnement « nominal » avec tous les EVC disponibles,
- situation de défaillance avec une vanne fermée,
- situation de défaillance avec quatre vannes fermées.

Pour tous les profils, les couples de niveaux amont/aval sont différents selon chaque situation, et pour le profil représentant une pile de la partie mobile la résultante de poussée des vannes est aussi différente. Il est supposé que les vannes restent en place même au-delà de leur cote de vulnérabilité théorique propre, ainsi les cotes de vulnérabilité pour le génie civil sont conservatives.

PROVISOIRE

Les études de stabilité ont été menées par analyse statique bidimensionnelle, selon les Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids du CFBR [4]

Pour la recherche de la cote de vulnérabilité, nous nous plaçons dans une situation « extrême », sans coefficients partiels. Les profils sont modélisés sans drainage pour les cas en crue, en effet en cas de surverse en rive la galerie de drainage pourrait être noyée, réduisant l'efficacité des drains.

La partie mobile du barrage est représentée par deux profils. En effet, des joints de dilatation séparent les piles et les seuils profilés, ces deux parties sont donc modélisées séparément.

Profil pile

Le profil pile ne comporte pas de cote de vulnérabilité pour les situations nominales et avec une vanne fermée. En effet, comme l'illustre la figure ci-dessous, le niveau aval est très haut et la différence de charge entre l'amont et l'aval est donc plus faible qu'à RN, malgré la remise en charge des vannes segment en position haute. Pour alimenter l'analyse de risques de l'EDD, une cote de vulnérabilité supérieure à 298,2 mNGF ($>> Q_{100000}$) a été fixée pour ces cas, correspondant au débit max étudié par l'étude hydraulique et non pas à une cote calculée par l'étude de stabilité.

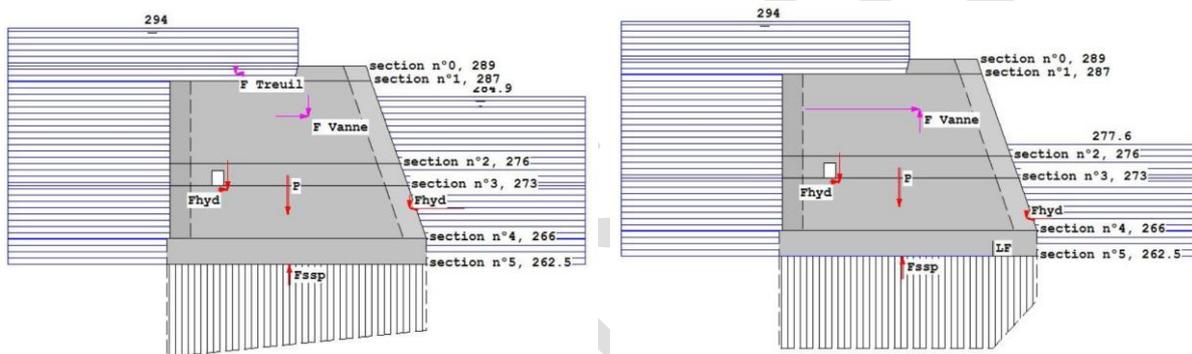


Figure 9 : Modélisation du profil pile en situation de crue nominale (gauche) et toutes vannes fermées (droite)

En situation toutes vannes fermées, le niveau aval étant bien plus bas, une cote de vulnérabilité de 294 mNGF a été déterminée, correspondant au non-respect du critère de résistance à l'effort tranchant pour la section béton-fondation.

Profil seuil

Les pressions hydrodynamiques sur la partie aval du profil seuil ont été modélisées à l'aide du modèle Flow3D pour les passes ouvertes. Elles sont modélisées par des forces ponctuelles sur chaque section géométrique. Pour le ou les passes restées fermées en situation de défaillance, le niveau aval hydrostatique a été considéré. Le profil seuil n'a pas de cote de vulnérabilité quelle que soit la situation, du fait de la montée du niveau aval.

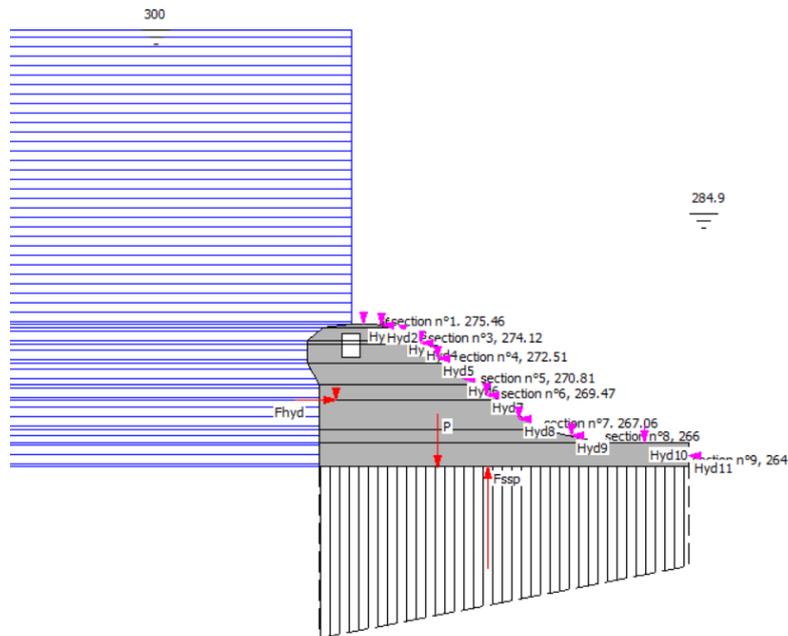


Figure 10 : Modélisation du profil seuil en situation de crue nominale

Profil seuil rive gauche

Le profil représentatif de la passe du clapet de régulation est modélisé, de manière conservative, sans tenir compte des bajoyers. Ici le niveau aval hydrostatique est considéré, l'évacuation se faisant par un pertuis, en charge pour les fortes crues. Le profil seuil RG n'a pas de cote de vulnérabilité quelle que soit la situation, du fait de la montée du niveau aval.

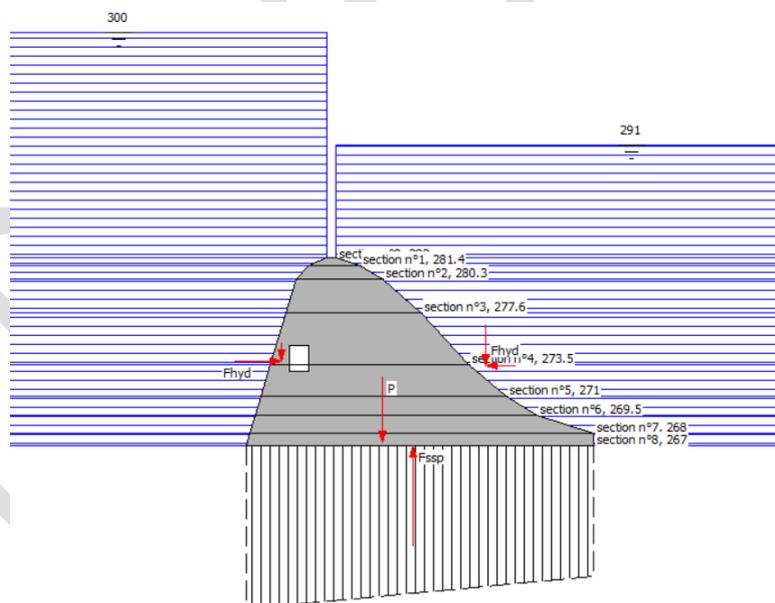


Figure 11 : Modélisation du profil seuil RG en situation de crue nominale

Plot de fermeture rive gauche

Le plot de fermeture, dit « culée », en rive gauche, est un barrage poids avec des redans à l'aval, remblayé et recouvert d'un dallage qui accueille une zone de stockage de batardeaux.

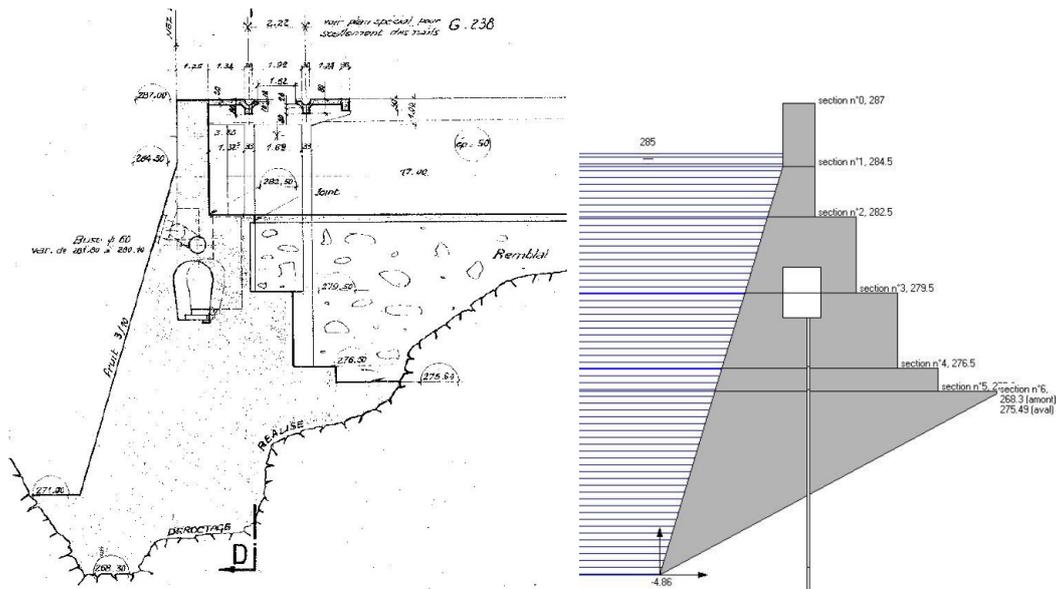


Figure 12 : Plan et modélisation du profil représentatif du plot de fermeture RG

L'étude de stabilité de ce plot de fermeture a permis de définir une cote de vulnérabilité de 287,4 mNGF pour toutes les situations (indépendant du niveau aval), soit à peine plus que la cote de surverse dans cette zone. Cette cote correspond à une crue de temps de retour 70 ans environ en situation nominale de crue (toutes vannes ouvertes). La section la plus critique est une section dans le corps du barrage à 282,5 mNGF. En effet, la partie haute du profil est relativement élancée et donc sensible à une hausse de la cote amont.

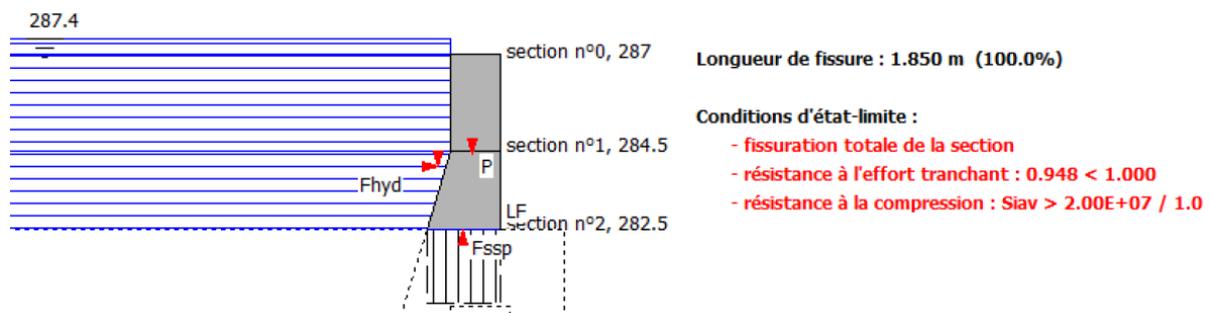


Figure 13 : Résultats du calcul de recherche de cote de danger pour le profil plot de fermeture rive gauche – cote à partir duquel les critères de stabilité ne sont plus respectés pour la section à 282,5 mNGF

Barrage usine

Compte tenu de son caractère massif et de la présence de l'ensemble de l'aménagement situé à l'aval (aspirateurs, canal de dégravolement, groupe pompe du Pouget - cf figure 11), le barrage usine ne fait pas l'objet d'un calcul de stabilité. Par ailleurs, en crue, le niveau aval et donc la contre-poussée hydraulique sont très importants ($\Delta H_{am-av} = 9,1$ m pour 18 m en situation normale – cf figure 12). La fonction de sûreté (retenir l'eau) de cette partie de l'ouvrage n'est donc pas remise en cause et il n'existe pas de cote de vulnérabilité. En revanche, étant donnée la submersion très significative par l'aval et la surverse dans cette zone, l'endommagement de l'outil de production et de certains éléments de structure auxiliaires (dont le toit) est probable.

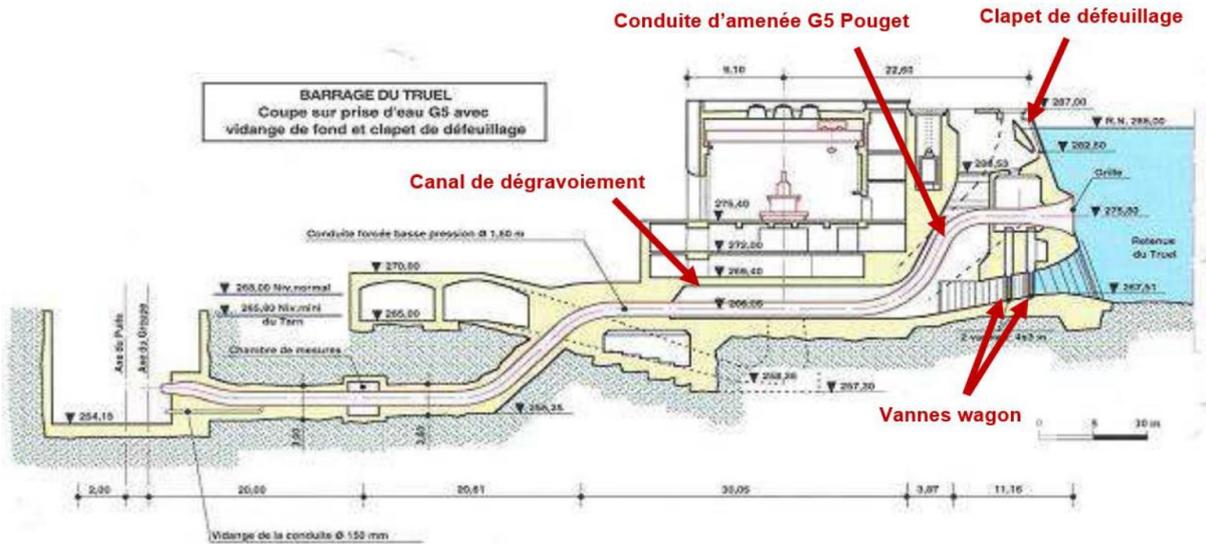


Figure 14 : Coupe sur le barrage-usine

294 NGF

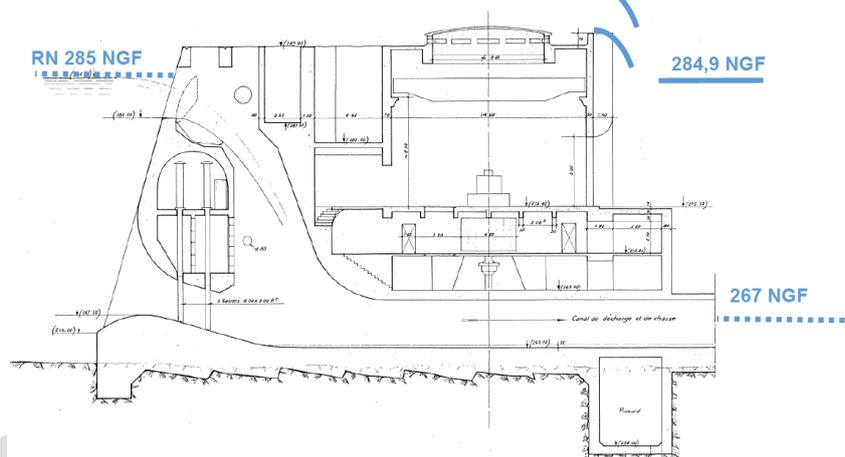


Figure 15 : Représentation des cotes amont et aval à RN et en crue (Q_{1000} ici) au droit du barrage-usine

Analyse du risque érosion

Une analyse du risque érosion a été menée sur la base de la conception de l'ouvrage, de l'historique du comportement depuis sa mise en service et des modélisations hydrauliques physiques et numériques réalisées.

Le barrage est fondé sur du rocher (Gneiss et Micaschiste). Les radiers des passes de l'EVC principal sont équipés de déflecteurs permettant de déporter la zone de dissipation d'énergie à l'aval (confirmé par modèle numérique). Le barrage déverse régulièrement et une érosion est observée dans une zone à l'aval des passes 1 et 2 en particulier, correspondant certainement à une zone de rocher plus érodable.



Figure 16 : Travaux de réparation d'une zone érodée à l'aval des passes 1 et 2 en 2016

L'observation de l'aval du barrage depuis sa construction montre que l'érosion est modérée et avec une cinétique lente en rapport au nombre d'évènements vécus. Compte tenu du matelas d'eau de plus en plus important à l'aval, le risque pour des crues plus importantes que celles observées jusqu'alors est considéré faible. En conclusion, il est considéré que les dispositions de surveillance en place (bathymétries périodiques et après chaque crue significative) permettent de suivre les dommages éventuels et d'intervenir si besoin. Le risque érosion en crue a été retenu pour l'analyse de risques de l'EDD ; cependant, il est considéré comme très improbable de déstabiliser le barrage et d'impacter son intégrité et ce risque n'est pas associé à une cote en particulier.

Résultats pour les vannes segments

Les vannes segments de l'ouvrage sont des vannes charpentées de 12 m de largeur, 12 m de rayon et 9,75 m de hauteur. Chaque vanne est manœuvrée par l'intermédiaire de deux chaînes Galle associées à des treuils montés de part et d'autre de la vanne.

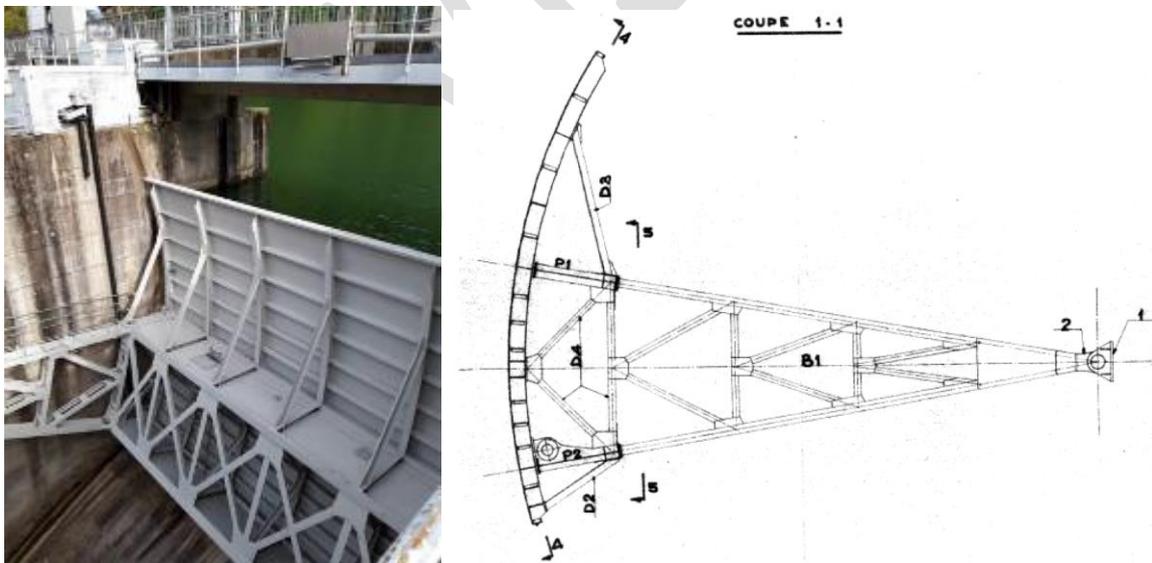


Figure 17 : Présentation des vannes segment – photographie et coupe sur structure charpentée

Les bras des vannes sont appuyés sur des corbeaux en béton armé de forme elliptique, via une pièce d'appui mécano-soudée.

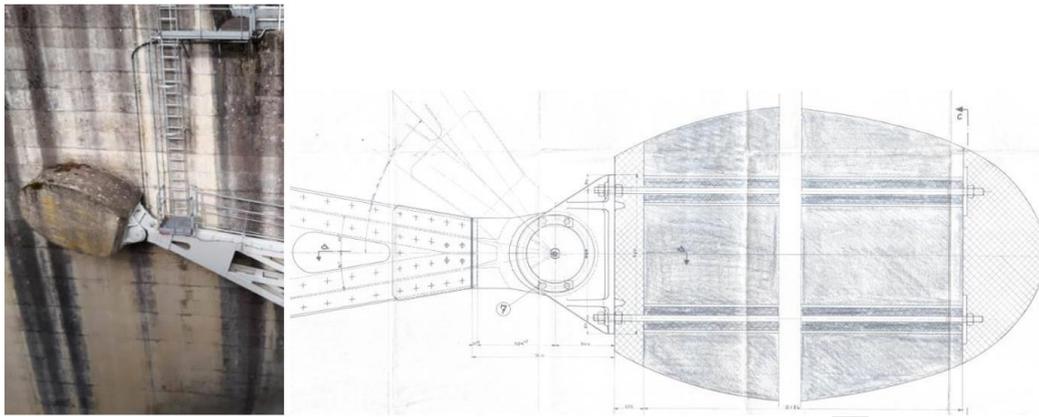


Figure 18 : Appuis des bras des vannes segment

Pour l'exemple concerné et pour les fortes crues, les vannes même en position « ouverte » sont remises en charge. Les études de stabilité des vannes segment prennent en compte donc la position ouverte et la position fermée. De même, l'analyse a balayé tous les modes de rupture possibles :

- stabilité locale des éléments de charpente,
- stabilité d'ensemble (notamment en position haute où la vanne n'est plus appuyée latéralement en partie supérieure),
- chute de la lame d'eau et de corps flottants sur le bras en cas de surverse ou de contournement via les piles,
- manque d'aération de lame d'eau en cas de surverse (surcharge),
- tenue des tourillons d'appui,
- maintien en position en cas de submersion des armoires électriques.

Ces modes de rupture ont été étudiés par le calcul ou par avis d'expert. Pour évaluer la stabilité locale et la stabilité d'ensemble une modélisation aux éléments finis a été réalisée. La tenue des tourillons (axe et palier) a été évaluée par calcul analytique.

L'interface entre les appuis des bras des vannes et des piles du barrage a également été examinée ; interface palier / corbeau et interface corbeau / pile. En effet, bien que le chargement pour un débit des vannes en position ouverte soit du même ordre de grandeur qu'à RN pour des crues déjà très importantes, la géométrie des appuis est bien plus défavorable en position ouverte.

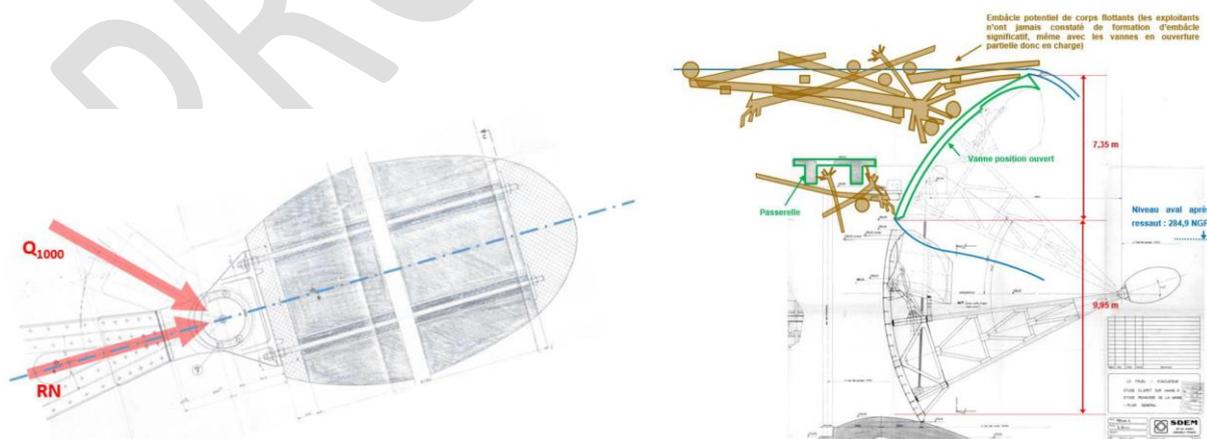


Figure 19 a) Orientation du chargement sur l'axe du tourillon selon situation RN et crue Q_{1000} b) coupe sur une vanne en charge à Q_{1000} avec corps flottants

Pour une vanne en position ouverte, la synthèse des résultats est résumée dans la figure ci-dessous :

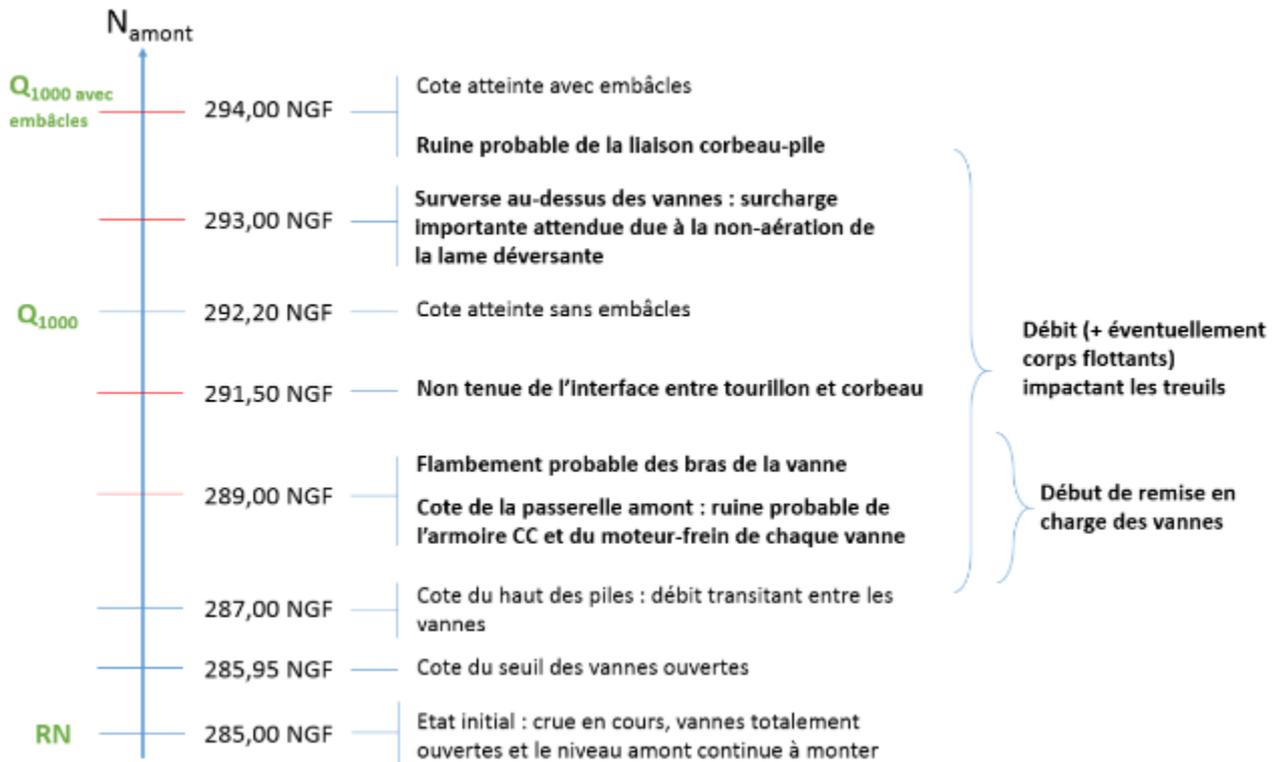


Figure 20 : Synoptique du comportement des vannes et des modes de rupture selon la cote amont

La cote de vulnérabilité retenue est de 291,5 mNGF pour une vanne en position ouverte, correspondant au glissement de l'appui de vanne sur le corbeau. En effet, le risque de flambement intervient à partir de 289 mGF mais des marges existent jusqu'à une cote de 292,2 m NGF environ.

Dans ces conditions et en cas de rupture de la vanne, les spécialistes mécaniques ont estimé que le risque de coincement de la vanne dans la passe était très faible et que la vanne serait emportée en aval du barrage. En effet, à pleine ouverture, la vanne est quasiment entièrement sortie des guidages en considérant par ailleurs le tirant d'eau dans la passe d'environ 10 m associé à des fortes vitesses d'écoulement.

Pour une vanne en position fermée (correspondant à une défaillance de non-ouverture ou de fermeture intempestive), il est estimé que la tenue n'est plus justifiée à partir du début du déversement par-dessus la vanne. En effet, dans ces conditions une poche de dépression pourrait se former à l'aval de la vanne, engendrant la surcharge de la structure. Aussi, les bras vont être sollicités dans des conditions non prévues (impact de la lame d'eau et d'éventuels corps flottants). La cote de vulnérabilité estimée en position fermée est donc supérieure à 285,5 mNGF, soit le niveau du bordé supérieur d'une vanne fermée.

4.5. Synthèse des situations et cotes de danger/vulnérabilité

Les études de stabilité du barrage et des vannes, l'analyse des observations visuelles régulières, le suivi du comportement mécanique et hydraulique de l'ouvrage, l'analyse du risque d'érosion aval en prenant en compte l'historique, l'organisation lors des passages de crues, les travaux réalisés et les analyses géologiques, hydrauliques et stabilité ont permis d'estimer les situations de danger en crue de l'ouvrage.

Les situations et cotes de vulnérabilité concernant les vannes et l'ouvrage de fermeture en rive gauche ont été séparées de celles du barrage « principal » (profil piles). Ces ouvrages sont ensuite analysés dans des événements redoutés centraux spécifiques dans l'analyse de risques.

Au regard des débits des ondes de rupture des différents profils étudiés, la cote de danger du barrage est déterminée par la cote de vulnérabilité du profil pile, qui est de loin le profil structurel du barrage composite qui va potentiellement libérer le plus de débit.

Les situations et cotes de danger et de vulnérabilité sont résumées dans le tableau suivant :

SITUATIONS		DEBIT (m ³ /s)	TEMPS DE RETOUR (ANS)	COTE DE RETENUE (m NGF)	DEBIT RELACHE (m ³ /s)
Crue exceptionnelle (Q ₁₀₀₀) toutes vannes ouvertes		7 018	1 000	294,0	-
Situations de danger du barrage					
Atteinte de la situation de danger « 298,2 m NGF toutes vannes ouvertes »		> 11 500	> 25 000	298,2	~ 1900
Atteinte de la situation de danger « 294 m NGF toutes vannes fermées »		~ 3 000	~ 25	294,0	~ 4000
Situations de danger des vannes					
Atteinte de la cote de vulnérabilité 291,5 m NGF toutes vannes ouvertes		~ 5 350	~ 240	~ 291,5	< 600*
Atteinte de la cote de déversement au-dessus de la vanne ouverte		~ 6 600	~ 700	~ 293,5	~ 600*
Atteinte de la cote de déversement d'une vanne fermée (les autres étant ouvertes)		~ 2 300	~ 14	285,5	~ 700
Situations de danger de l'ouvrage de fermeture rive gauche**					
Atteinte de la cote de vulnérabilité	4 vannes segment ouvertes	~ 4 000	~ 70	287,4	~ 200
	1 vanne segment fermée	~ 3 100	~ 30	287,4	~ 200
	4 vannes segment fermées	~ 200	≤ 1	287,4	~ 200

*La cote de vulnérabilité de la vanne a été estimée supérieure à 291,5 m NGF, et jusqu'à 293,5 environ selon les modes de rupture (confer 4.4). Les ordres de grandeurs de débits de crue, de débits relâchés et de différence entre niveau amont et niveau aval sont les mêmes sur cette gamme ; les résultats pour une rupture à la cote 293,5 m NGF ont donc été utilisés pour quantifier les conséquences aval dans les cas d'une potentielle rupture entre 291,5 et 293,5 m NGF.

**Une analyse des débits relâchés et débits déjà établis à l'aval pour différents scénarios de rupture de l'ouvrage de fermeture a montré que cette rupture n'a pas d'influence sur la tenue de la partie barrage vanné.

4.6. Conclusion de l'étude de cas

Dans cette étude de cas, la forte augmentation de l'hydrologie induit l'atteinte de niveaux d'eau amont et aval très importants en crue de dimensionnement (Q₁₀₀₀), la « PHE » historique étant atteinte pour un temps de retour de 100 ans environ. Les études présentées ci-dessus ont permis de définir les situations de danger de chaque élément de l'ouvrage en fonction des niveaux amont et aval et des différents scénarios de défaillance de vanne afin d'avoir une exhaustivité des événements initiateurs à la rupture de chaque élément en crue. Ce cas particulier démontre qu'une seule cote de danger ne peut caractériser le vrai risque d'exhaussement du plan d'eau de cet ouvrage conduisant à une libération incontrôlée de l'eau de la retenue.

Les résultats montrent une atteinte de cotes de vulnérabilité de deux éléments du barrage pour des crues inférieures à la crue de dimensionnement (Q₁₀₀₀) : les vannes segment (remises en charge par le niveau amont) et l'ouvrage de fermeture en rive gauche. Il est à noter que les études de conséquences aval (par approche « différentielle » avec la crue déjà établie) ont montré une très faible vulnérabilité aval en cas de rupture de ces éléments en crue, le débit dans la rivière à l'atteinte de ces cotes étant très significativement supérieur au débit relâché par la rupture. Dans ces conditions, le barrage peut être considéré comme ayant un niveau de sûreté acceptable en crue au regard de la combinaison occurrence / conséquence, dans la synthèse de l'analyse de risques de l'EDD.

5. CONCLUSION

L'arrêté de septembre 2018 [1] indique que l'Etude de Dangers (EDD) doit établir « au regard de la stabilité de l'ouvrage, la cote de danger, intrinsèque à l'ouvrage [...], c'est-à-dire la cote de retenue au-dessus de laquelle la stabilité de l'ouvrage n'est plus garantie. »

Contrairement aux pratiques des EDD 1, EDF-CIH, pour les EDD de deuxième génération, détermine des cotes de danger spécifiques aux ouvrages en prenant en compte la sensibilité intrinsèque du barrage à l'exhaussement du plan d'eau et le risque d'érosion. En fonction du type d'ouvrage, la définition d'une cote unique ne suffit pas et il faut définir des situations de danger. Par exemple, pour un barrage voute sensible thermiquement, il pourra y avoir une cote de danger estivale et une cote de danger hivernale. Pour un Barrage Mobile en Rivière, les situations de danger pourront être décrites par une combinaison d'une cote amont, d'une cote aval et d'un scénario de défaillance de vannes. Cette méthode permet d'être exhaustif lors de la réalisation de l'analyse de risques pour trouver les événements initiateurs de la rupture barrage à l'exhaussement du plan d'eau en conditions extrêmes.

Enfin, pour un barrage composite dont les composants présentent des caractéristiques constructives suffisamment variées et indépendantes pour que la rupture de l'un puisse se produire sans entraîner la rupture des autres de façon simultanée, des cotes de vulnérabilité sont définies pour chaque composant. La cote danger de l'ouvrage est alors la plus petite des cotes de vulnérabilité sauf si le composant est de taille mineure comparée à l'ouvrage et est traité à part, dans un ERC spécifique.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Arrêté du 3 septembre 2018 modifiant l'arrêté du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu, Ministère de la transition écologique et solidaire.
- [2] Houdant et al. ETABLIR LA COTE DE DANGER D'UN BARRAGE. QUESTIONS SOULEVÉES ET ÉLÉMENTS MÉTHODOLOGIQUES POUR Y RÉPONDRE. Colloque CFBR : « Justification des barrages : Etat de l'art et Perspectives », Chambéry, 27 et 28 novembre 2019
- [3] Kent Walker (USBR), Jaron Hasenbalg (USBR), Shannon Monahan (USBR), Nate Sprague (USBR), PHYSICAL MODEL OF SPILLWAY AND RESERVOIR DEBRIS INTERACTION, U.S. Society on Dams, 2018.
- [4] CFBR, Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages-poids, 2012