

# REEVALUATION DU RISQUE DE GLISSEMENT DU BILLAN ET DE LA VAGUE INDUITE SUR LE BARRAGE DE GRAND MAISON

## *Reevaluation of Billan landslide risk and the induced wave on the Grand Maison dam*

**Fanny DUBIÉ, Fabian GOEURY**

EDF CIH, 4 Allée du Lac de Tignes 73290 La Motte Servolex  
[fanny.dubie@edf.fr](mailto:fanny.dubie@edf.fr) ; [fabian.goeury@edf.fr](mailto:fabian.goeury@edf.fr)

**Cynthia GALLI**

EDF TEGG, 180 rue du lieutenant Parayre 13290 Aix en Provence  
[cynthia.galli@edf.fr](mailto:cynthia.galli@edf.fr)

**Stéphane KRIGLER, Amandine VIGLINO**

EDF DTG et CIH, 134 Chemin de l'Étang 38950 Saint Martin Le Vinoux  
[stephane.krigler@edf.fr](mailto:stephane.krigler@edf.fr); [amandine.viglino@edf.fr](mailto:amandine.viglino@edf.fr)

### MOTS CLEFS

Glissement de terrain, vague induite en retenue

### KEY WORDS

Landslide, induced wave

### RÉSUMÉ

*Le 26 mai 1986, un important glissement de terrain s'est déclenché en rive droite de la retenue du barrage de Grand-Maison, alors que la mise en eau du barrage était en cours. Les nombreuses investigations réalisées à la suite de cette découverte ont permis de mettre en évidence un phénomène de fauchage généralisé du massif rocheux constitutif du versant, et d'établir les causes de déclenchement du glissement : une piézométrie élevée suite à la fonte d'un important stock nival et la réduction de la butée de pied (retrait d'environ 5 millions de mètres cubes de matériaux constitutifs d'une partie du corps du barrage) ont déstabilisé une vaste loupe installée au sein des terrains fauchés, marquée en tête par une crevasse d'environ 250 m de longueur. Le creusement d'une galerie de drainage de 850 ml dès juillet 1986 a permis de stabiliser durablement la piézométrie dans le massif rocheux. Les calculs de vague réalisés en 1986 par modèles réduits avaient conduit à évaluer un risque de submersion du barrage en cas d'arrivée brutale et rapide d'un important volume rocheux fragmenté dans la retenue, en tenant compte de plusieurs jeux d'hypothèses de vitesses et de volumes, dont certaines nécessairement conservatives dans une démarche d'étude de sensibilité. De même, les calculs de stabilité réalisés en 1987 n'intégraient pas les effets de la galerie de drainage sur la piézométrie dans les terrains potentiellement instables. A la lumière des exigences réglementaires actuelles, et compte-tenu de près de 40 ans de données d'auscultation de ce glissement et plus largement de l'ensemble du versant fauché, il est apparu nécessaire de réactualiser les calculs de stabilité et de vague générée. Des hypothèses raisonnablement conservatives ont été retenues, à partir des données piézométriques fiabilisées, de la réévaluation de la géométrie et notamment du volume du glissement, confirmés par les données topographiques récentes, et en tenant compte d'une vitesse de glissement maximum crédible*

limitée à quelques m/s au vu du type de glissement. Les calculs de stabilité réalisés montrent des marges de sécurité satisfaisantes au regard des exigences réglementaires actuelles (Arrêté Technique Barrage), pour l'ensemble des situations considérées. Par ailleurs, les calculs de vague (réalisés selon la méthodologie de l'Office Fédéral de l'Energie en Suisse) en cas de réactivation brutale et massive du glissement montrent l'absence de surverse de la crête du barrage, y compris à la cote de retenue normale.

## ABSTRACT

On May 26, 1986, a major landslide occurred on the right bank of the Grand-Maison dam reservoir, while the dam's filling was in progress. The numerous investigations carried out following this discovery revealed a widespread cutting of the rock mass phenomenon and established the causes of the landslide: high piezometric levels due to the melting of a significant snow accumulation and the recent reduction of the passive earth pressure (about 5 million cubic meters of materials were removed to build a part of the body of the dam) destabilized a large lens included in the disorganized rock mass, marked at the top by a crack approximately 250 meters long. The construction of a drainage gallery starting in July 1986 enabled the piezometric level to be permanently stabilized. Wave calculations carried out in 1986 using reduced models led to consider the risk of submersion of the dam, in the event of a sudden and rapid arrival of a large volume of fragmented rock into the reservoir, taking into account several sets of speed and volume assumptions, some of which were necessarily conservative in a sensitivity study approach. By the same, stability calculations carried out in 1987 did not take into account the effects of the drainage gallery on the piezometric levels in potentially unstable terrain. In light of current regulatory requirements and considering nearly 40 years of monitoring data on this landslide and more broadly on the entire cut hillside, it became necessary to update the stability and wave generation calculations. Reasonably conservative hypotheses were adopted, based on reliable piezometric data, reevaluated geometry, and particularly the volume of the landslide, confirmed by recent topographic data, and taking into account a credible maximum sliding speed limited to a few meters per second given the type of landslide. The stability calculations carried out show satisfactory safety margins with current regulatory requirements (Arrêté Technique Barrage), for all considered situations. Moreover, the wave calculations (based on the methodology of the Swiss Office Fédéral de l'Energie) carried out according to the methodology of the Swiss Federal Office of Energy) in the event of a sudden and massive landslide reactivation show that there would be no overtopping of the top of the dam, even at the normal top water level.

## 1. CONTEXTE

Le 26 mai 1986, tandis que la retenue de Grand Maison était encore en cours de remplissage, un glissement de terrain s'est amorcé environ 2 km en amont rive droite de la retenue, se traduisant par une crevasse de 250 m de longueur (rejet vertical pouvant atteindre 80 cm), un affaissement au niveau de la route (en pointillé blanc sur la figure ci-dessous) ainsi que des fissures dans le revêtement bitumineux. Le plan d'eau fut alors abaissé progressivement, en plusieurs phases, à cause du risque de submersion du barrage en cas de glissement de terrain important.

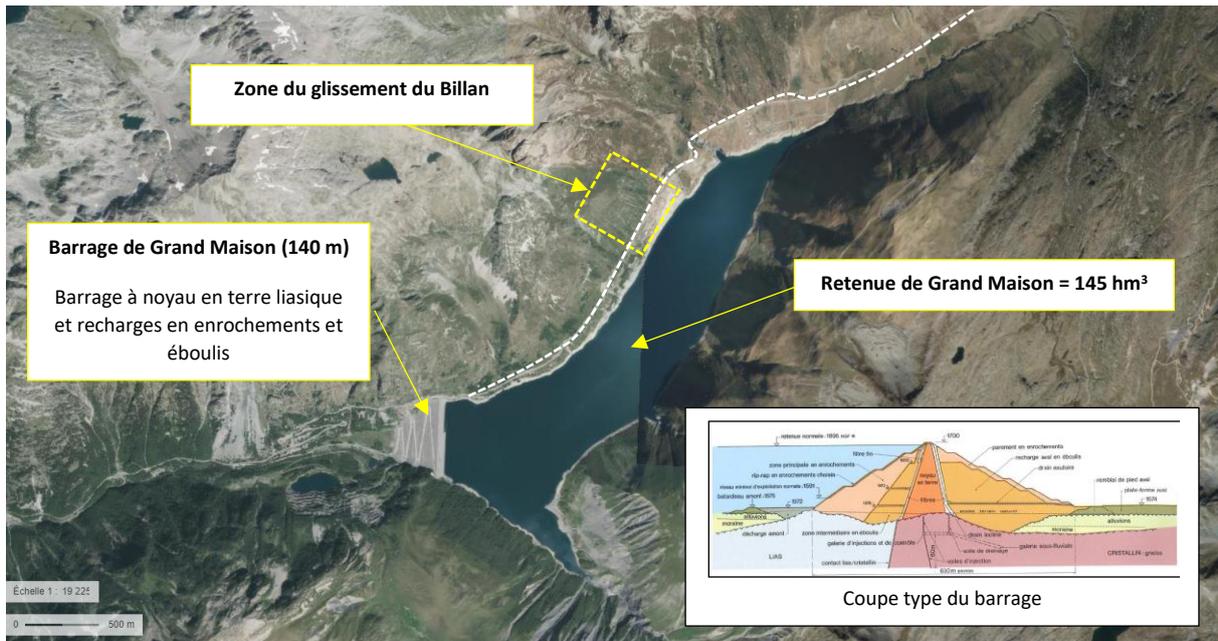


Figure 1 : Vue aérienne d'ensemble de la zone

Pour essayer de comprendre le phénomène en jeu, un dispositif d'auscultation topographique et piézométrique fut rapidement mis en place. Les premières interprétations qui en ont découlé ont conduit dès juillet 1986 au creusement d'une galerie de drainage de 3,5 m de diamètre et de 850 m de longueur, dont l'effet bénéfique permit de remonter le plan d'eau.

L'analyse des faits amena à attribuer le déclenchement du glissement du Billan à une montée piézométrique exceptionnelle au sein du versant liée à une fonte nivale rapide d'un stock neigeux très important, venant s'ajouter à une réduction récente de la butée de pied dans certaines zones d'emprunt ayant servi à la construction du barrage (5 millions de m<sup>3</sup> d'éboulis et moraines en pied de versant exploités entre 1981 et 1984).

Une première étude sur modèle réduit réalisée en 1986 au LNHE (Laboratoire National d'Hydraulique d'EDF) [8] montra qu'à RN (1695 m NGF), le glissement du Billan dans la retenue provoquerait une vague de 4 à 7 m entraînant la submersion du barrage, et qu'en dessous de la cote 1685 m NGF les conséquences seraient négligeables sur le barrage de Grand Maison.

Depuis cette période, la retenue de Grand Maison est exploitée 10 m sous sa RN en période printanière (soit un volume de 21 hm<sup>3</sup> correspondant à 15% du volume utile). La remontée de la cote de retenue n'est effectuée qu'une fois que les mesures de nivellement et les premières mesures dans la galerie de drainage ont été réalisées et qu'elles confirment l'absence d'évolution significative.

L'Étude de dangers (EDD) 2024 a été l'occasion de se pencher sur ce glissement, son évolution depuis près de 40 ans et son potentiel impact sur la retenue, en prenant en compte les nouvelles méthodes de calcul de vague, les outils numériques récents pour mieux appréhender les volumes en jeu au niveau du glissement historique, mais également les sollicitations réglementaires actuelles.



Figure 2 : Vue de la crevasse de tête en 1986

## 2. OBJET DE L'ARTICLE

En se basant sur le retour d'expérience (REX) de près de 40 ans de mesures d'auscultation du glissement, il est apparu que les hypothèses prises en compte dans le dernier calcul de stabilité réalisé sur le glissement en 1987 [9], notamment de piézométrie dans le versant, étaient obsolètes et trop conservatives par rapport aux données actuelles. En effet, la piézométrie utilisée en 1987 pour les calculs n'intégrait pas encore tous les effets drainants de la galerie au vu du récent forage de cette dernière.

Le REX mondial des glissements de terrain permet également aujourd'hui de mieux approcher le volume de matériaux qui arriverait réellement en fond de vallée.

Les données d'entrées utilisées à l'époque dans les modèles réduits pour les calculs de vague sont apparues également largement surestimées, notamment la vitesse de glissement, au vu de l'analyse géologique du phénomène en jeu (glissement rotationnel et non banc sur banc).

Enfin, les règles de l'art en termes de calcul de vague ont également évolué.

Au vu de l'ensemble de ces éléments, plusieurs sujets ont été développés (objet du présent article) :

- Mise à jour de l'étude de stabilité du versant avec le retour d'expérience de près de 40 ans de mesures d'auscultation et suivant les nouvelles sollicitations de l'ATB [1] ;
- Levée des conservatismes concernant les paramètres de définition du glissement de terrain qui sont les plus influents dans le calcul de vague (étude de sensibilité).  
Les deux paramètres identifiés étant le volume de matériau ayant glissé et sa vitesse, l'objectif était de définir des valeurs conservatives mais raisonnables pour ces deux paramètres, soit au travers d'outils numériques récents ou de nouveaux guides pour le volume, soit à dire d'expert par analogie avec des mouvements de même nature connus par ailleurs en ce qui concerne la vitesse.
- Nouveau calcul de vague avec une méthodologie récente et les nouvelles données d'entrée de définition du glissement.

## 3. DONNEES GEOLOGIQUES ET GEOMETRIQUES HISTORIQUES SUR LE GLISSEMENT

L'analyse des premières données d'auscultation (sondages carottés, piézomètres, inclinomètres, topographie ...) a permis de réaliser les premières interprétations du glissement et notamment les éléments suivants :

- Coupe géologique faisant apparaître l'épaisseur de matériaux fauchés (45m max) et le contact Lias/Cristallin,
- Position du cercle de glissement grâce aux inclinomètres, aux relevés topographiques (Cf figure 4) et à la position des crevasses de tête,
- Position de la ligne de saturation dans le versant grâce aux piézomètres.

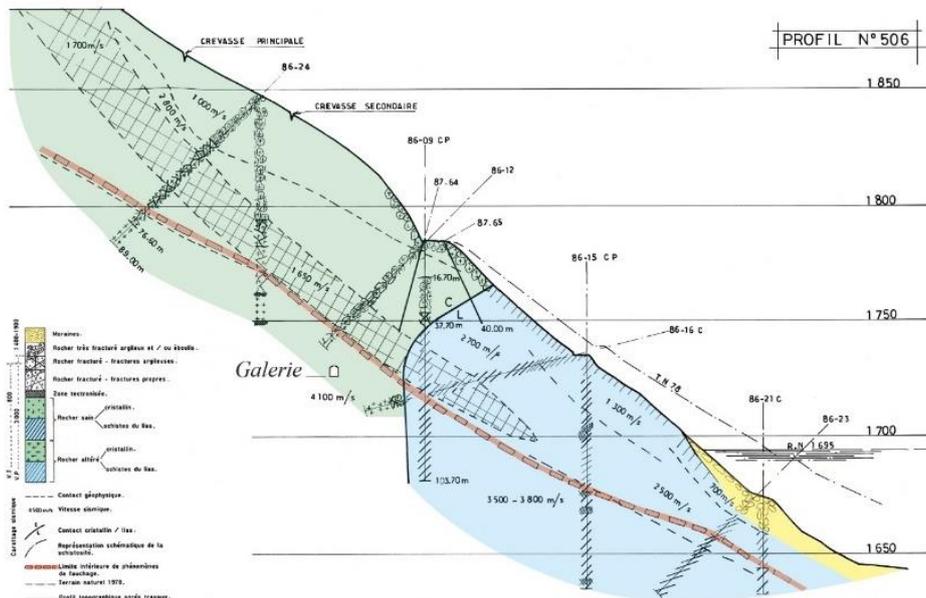


Figure 3 : Résultats des sondages ayant conduit à la coupe géologique sur le profil central (506)

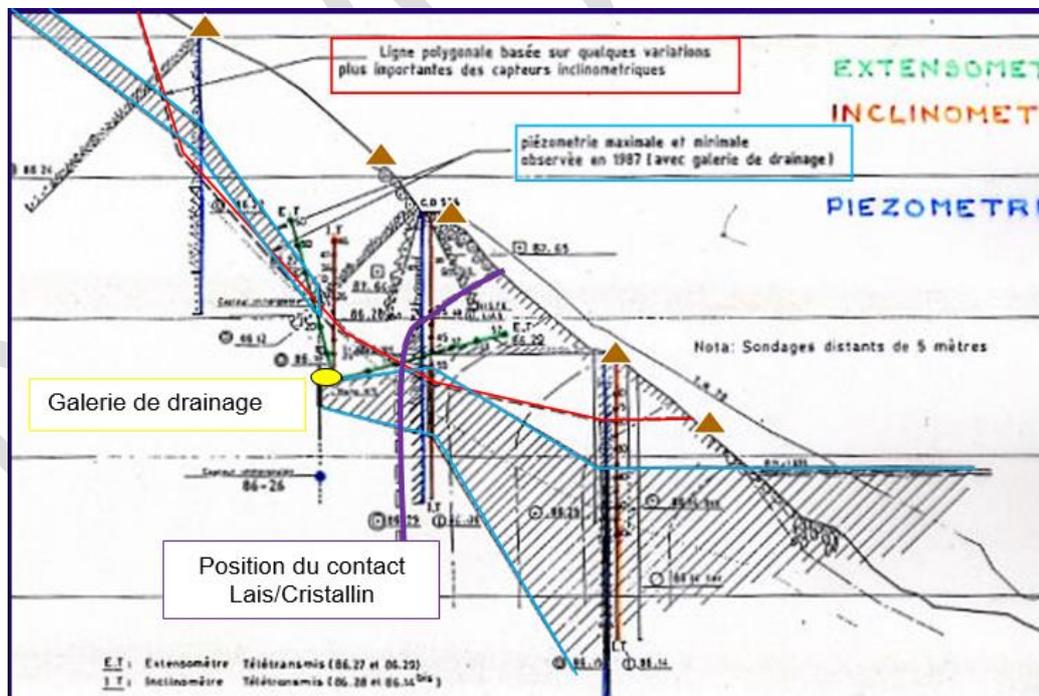


Figure 4 : Localisation des dispositifs d'auscultation mis en place et 1ères analyses tirées

Les mouvements enregistrés au niveau de ce versant sont à rapprocher de plusieurs phénomènes :

- un **phénomène de fauchage** généralisé du versant, de moindre amplitude et peu sensible à la piézométrie dans le versant. Il s'agit d'un phénomène progressif de déformation superficielle d'un massif rocheux, sous l'effet de la gravité, caractérisé par l'inclinaison vers la vallée des tranches des

couches qui affleurent sur un versant. Ce phénomène est particulièrement sensible dans les séries feuilletées ou stratifiées ou, plus généralement, présentant une famille de discontinuités à pendage très redressé et de direction parallèle à la vallée.

Ce phénomène se traduit par une couche superficielle de matériaux désorganisés (fauchés). Comme évoqué dans le Plan Particulier d'Intervention (PPI), ce type d'instabilité induit des risques négligeables pour la retenue car il correspond à des volumes limités (cf. zone de tête Ravin de Courbassière) dont l'impact avec le plan d'eau serait soit fortement improbable, soit étalé dans le temps et dans l'espace.

- un **glissement de type rotationnel**, dans ces matériaux rocheux désorganisés par le fauchage, directement liés à la piézométrie et responsable de la formation de la crevasse de tête et selon lequel s'est probablement produit l'essentiel des déplacements observés au début de l'été 1986,

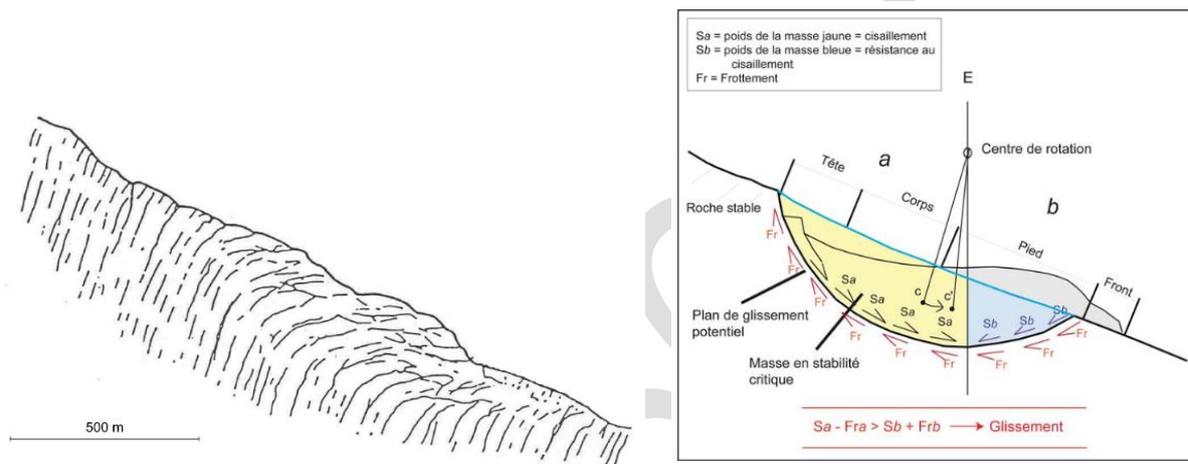


Figure 5 : Schéma de principe schématique illustrant les phénomènes de fauchage (à gauche) et un glissement rotationnel (à droite)

Le glissement du Billan est donc bien un glissement composite, intégrant ces deux phénomènes.

#### 4. NOUVELLE ETUDE DE STABILITE DU VERSANT REALISEE DANS LE CADRE DE L'EDD

Dans [2], en se basant sur l'analyse des mesures d'auscultation réalisées depuis bientôt 40 ans sur le glissement, la stabilité du glissement a été ré-évaluée dans différentes situations.

Grace à près de 40 ans de mesures enregistrées, on sait désormais que :

- Le glissement est largement stabilisé,
- Les faibles déplacements encore observés sont attribués au phénomène naturel de fauchage du versant (phénomène lent) et ne présentent aucune corrélation avec la cote de retenue de Grand Maison,
- La piézométrie reste très bien rabattue (plusieurs dizaines de mètres sous la piézométrie ayant déclenché le glissement) et ne montre pas d'évolution irréversible à la hausse,
- 90 % du débit mesuré provient de discontinuités naturelles (la galerie, non revêtue, fonctionne comme un drain géant)
- La capacité de drainage de la galerie n'est pas remise en cause étant donnée l'absence de baisse irréversible des débits ou de montée irréversible de la piézométrie dans le versant,
- La capacité de drainage de la galerie n'est pas remise en cause, même en cas de forts épisodes pluvieux ou fonte nivale, dans la mesure où les pics historiques de débits ne se traduisent pas par des pics historiques de piézométrie.

La nouvelle étude de stabilité a été réalisée avec l'outil de calcul Talren V6, suivant la méthode de Bishop (méthode des perturbations et surfaces de ruptures polygonales en 1987 [9]) et en prenant en compte pour la situation en exploitation normale, la valeur moyenne de la piézométrie stabilisée depuis 40 ans (soit une piézométrie plusieurs mètres en dessous de celle utilisée pour ce calcul en 1987).

Situations étudiées	Avis sur le risque de glissement
En cas d'hydrométrie moyenne	Le rabattement de la nappe par la galerie de drainage confère une marge de sécurité importante ( $FS \approx 1,3$ ) vis-à-vis de la réactivation du glissement <b>Risque de glissement extrêmement peu probable</b>
En cas d'hydrométrie élevée	Le retour d'expérience montre la bonne capacité de la galerie de drainage à rabattre la nappe, même en situation de précipitations ou de fonte des neiges importantes (*). En supposant néanmoins que celle-ci pourrait remonter au-delà du maximum historique, une marge de sécurité confortable vis-à-vis de la réactivation du glissement reste garantie ( $FS \approx 1,2$ ). <b>Risque de glissement extrêmement peu probable</b>
En cas de capacité de drainage réduite de la galerie	Compte-tenu de sa conception et du retour d'expérience de son fonctionnement, une perte d'efficacité du drainage semble difficilement envisageable. Même dans ce cas, le calcul réalisé en supposant une remontée de nappe dans le versant montre qu'une marge de sécurité confortable vis-à-vis de la réactivation du glissement reste garantie. <b>Risque de glissement par réduction de la capacité de drainage extrêmement peu probable</b>
En cas de séisme	Le calcul réalisé vis-à-vis du SES montre un coefficient de sécurité de l'ordre de 1,1. Pour obtenir un coefficient de sécurité de l'ordre de 1,0, il faut majorer l'accélération de 50% par rapport au SES ( $PGA = 0.18g$ ). Il convient par ailleurs de souligner que la méthode de calcul utilisée (pseudo statique) est conservatrice et que le fait d'obtenir un coefficient de sécurité de 1,0 ne signifie pas qu'une rupture généralisée avec grand déplacement de la surface étudiée se produirait. <b>Risque de glissement très improbable</b>

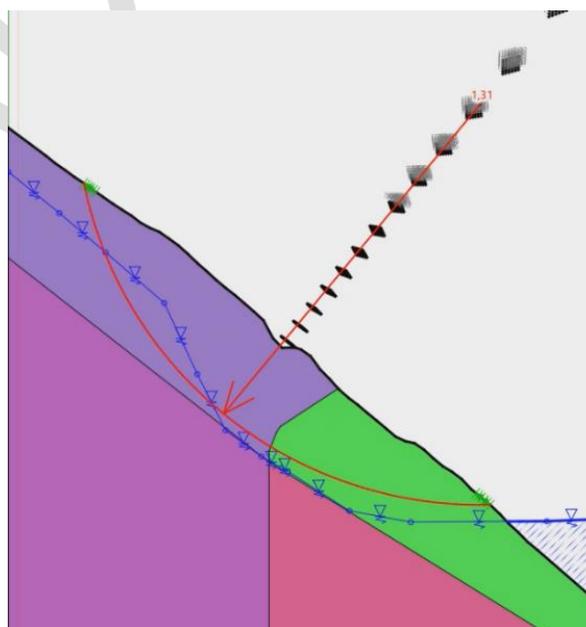


Figure 6 : Facteur de sécurité obtenu en condition normale

## 5. ESTIMATION DE LA VITESSE DE GLISSEMENT MAXIMUM CREDIBLE

Les matériaux glissés du Billan sont des schistes du Lias et des gneiss du cristallin de Belledonne fortement désorganisés par fauchage. L'activité forte du glissement observée en 1986 (vitesses de crise évaluées de l'ordre du millimètre par heure) a rapidement été stabilisée par la création de la galerie de drainage. Les déformations actuellement observées sont très lentes (de l'ordre de quelques millimètres par an) et sont attribuables au fauchage.

Si la crevasse de tête du glissement marque bien l'existence d'une surface de rupture, aucune certitude n'est établie sur la continuité de cette surface jusqu'en pied de versant. Une incertitude subsiste sur l'état du glissement, s'il a atteint ou non un état résiduel.

L'absence d'imposantes masses rocheuses abruptes et décomprimées en tête du glissement, masses qui auraient pu être déstabilisées par le cumul de déplacement des terrains formant la pente sous-jacente, permet d'écarter un scénario très rapide d'éboulement rocheux de nature à avoir un impact significatif sur la retenue ou le barrage.

Compte-tenu de la typologie du glissement, un scénario réaliste serait très probablement caractérisé par une vitesse tout au plus limitée à quelques mètres par jour en cas de réactivation. Les exigences de sécurité conduisent toutefois à considérer un scénario « rapide » largement majorant, avec une vitesse de l'ordre de 10 m/s.

## 6. ESTIMATION DES DIFFERENTS VOLUMES DE MATERIAUX EN JEU

### 6.1. Volume total de matériaux contenu dans le glissement mis en mouvement en 1986

#### 6.1.1. Données historiques

Dans le document [4] rédigé dans le cadre des PPI en 1996 par le département Techniques de réalisation et Expertises en Géosciences et Génie civil (TEGG), le volume de matériaux en jeu concernant le glissement rotationnel du Billan était donné entre 500 000 et 1 000 000 m<sup>3</sup>, suivant l'épaisseur et la géométrie de glissement considéré.

Dans le premier modèle physique réalisé par le LNHE en 1986, la fourchette de volume modélisée allait de 0,6 à 2 millions de m<sup>3</sup>, vraisemblablement pour avoir une étude de sensibilité sur l'effet du volume sur le calcul de vague.

#### 6.1.2. Résultats du modèle 3D réalisé en 2024

Afin d'objectiver un peu mieux le volume réellement en jeu lors de glissement de 1986, un modèle 3D a été réalisé.

#### Données d'entrée du modèle :

- Le Lidar pour le profil du TN,
- Les sondages de l'époque avec la position du contact matériaux fauchés/matériaux sains,
- La position altimétrique de la crevasse de tête et sa longueur (300m),
- Les données d'auscultation historique (déplacement en surface + inclinomètre) ayant permis de retracer la surface probable de glissement (cf. figures 3 et 4).



Figure 7 : Vue du modèle 3D depuis la surface

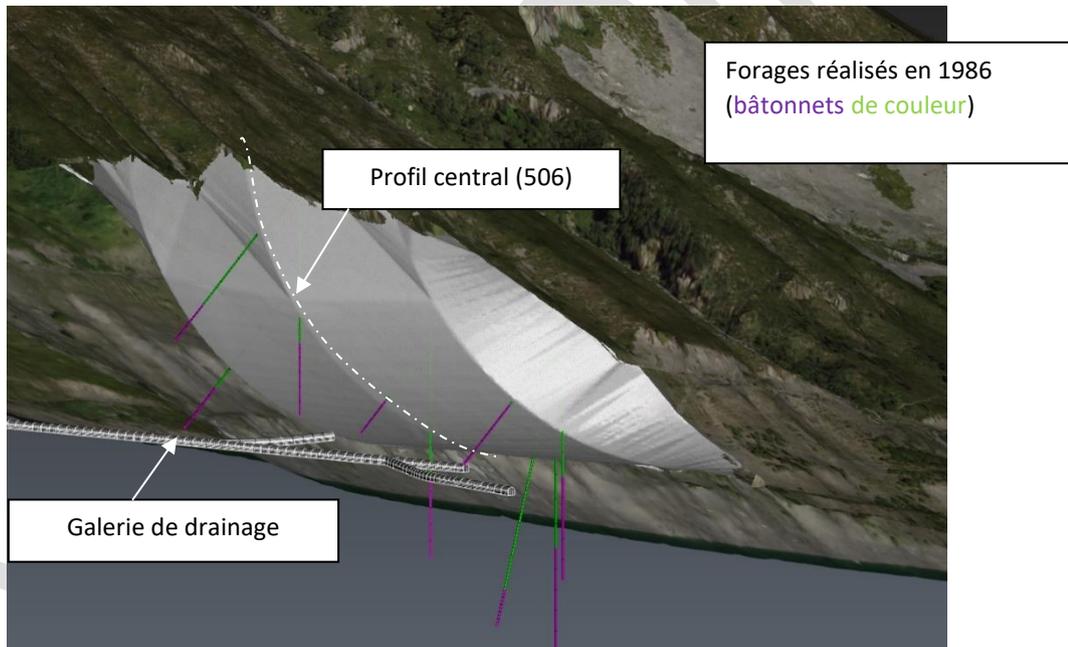


Figure 8 : Vue du modèle 3D côté souterrain (galerie de drainage, volume de glissement calculé)

Le volume correspondant à la loupe de glissement de 1986 a été estimé à  $1\,500\,000\text{ m}^3$ . En considérant la largeur max de la crevasse et l'épaisseur max de matériaux fauchés, il n'est pas étonnant de retomber sur la fourchette haute d'estimation de l'époque.

Nota : pour info, la surface de glissement a été dessinée concave (remontée sur les bords RD et RG) pour coller à la physique d'une lentille de glissement circulaire. Le volume calculé en assimilant cette surface à un cylindre (remontée droite sur les bords) engendrait une augmentation du volume de l'ordre de 15%.

## 6.2. Volume de matériau qui atteindrait la retenue en cas de glissement brutal

Dans le guide DGPR [5], sur la base de 1239 cas de glissements de terrain dans le monde, une analyse de leur cause a été réalisée. Il en ressort que globalement deux causes principales sont en jeu (40% chacune environ) : les fortes pluies ou fontes nivales et les séismes.

Nota : les cas de glissement par suite d'un séisme ont eu lieu dans des zones très sismiques où les séismes déclencheurs présentaient des magnitudes supérieures à 7 (largement supérieures au site de Grand Maison).

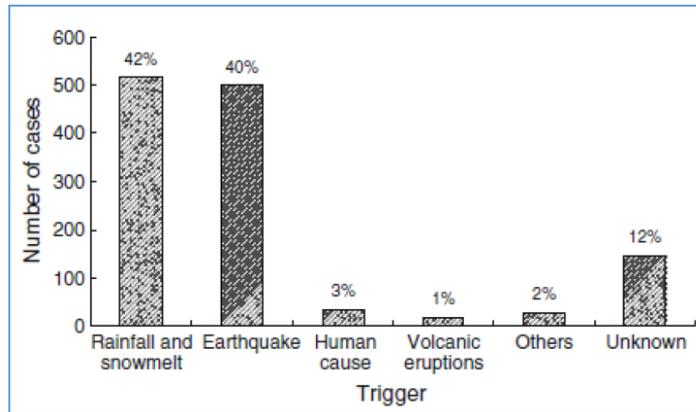


Figure 9 : Causes des glissements de terrains (sur 1239 cas étudiés) selon Peng et Zhang – 2012 [5]

Dans le guide DGPR [5], à partir de REX mondiaux, il est proposé différentes relations pour estimer le volume qui se retrouve en fond de vallée (volume du « barrage ») par rapport au volume du glissement de terrain. Le terme « dam » représente ici le barrage naturel formé en fond de vallée par le glissement.

Dans ce guide, Ermini et Casagli, à partir de l'étude de 143 cas historiques, proposent ainsi de retenir un ratio de 40% si le glissement est déclenché par des fortes pluies et 60% si c'est par un séisme.

	Landslide triggered by rainfalls	Landslides triggered by earthquakes
% stable dams	20	43
% unstable dams	80	57
Mean landslide volume (m <sup>3</sup> )	$3.11 \times 10^7$	$8.02 \times 10^7$
Mean dam volume (m <sup>3</sup> )	$1.51 \times 10^7$	$6.10 \times 10^7$
Mean % of landslide volume contributing to dam	39.91	56.9

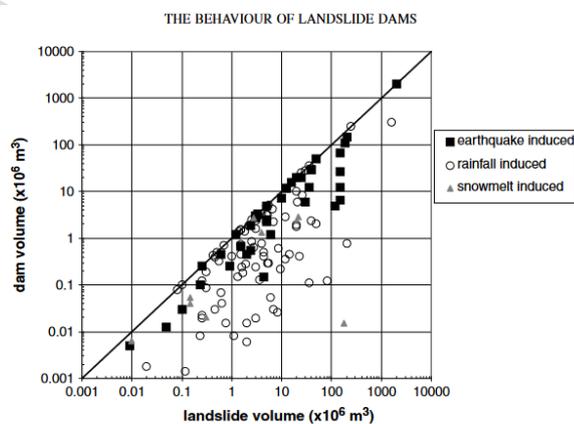


Figure 5. Comparison of landslide volume and landslide dam volume for the categories of landslides triggered by earthquakes, rainfall and snowmelt (143 case histories)

Figure 10 : Relations entre les volumes de glissement de terrain et du barrage naturel qui se crée en fond de vallée en fonction de la cause du glissement selon Ermini et Casagli (2003) [5]

### 6.3. Volume de matériau retenu pour le calcul de vague

Au vu de ces éléments, le volume de matériaux arrivant dans la retenue de Grand Maison a été estimé à :

En cas de glissement du Billan suite à un phénomène hydrologique majeur	En cas de glissement du Billan suite à un séisme
40% * 1,5 millions de m <sup>3</sup>	60% * 1,5 millions de m <sup>3</sup>
<b>V = 0,6 Mm<sup>3</sup></b>	<b>V = 0,9 Mm<sup>3</sup></b>

## 7. VAGUE INDUITE PAR UN GLISSEMENT DE TERRAIN : EVOLUTION DES METHODES ET NOUVEAUX RESULTATS

Le glissement du Billan a fait l'objet de deux modèles réduits physiques conçus par le Laboratoire National d'Hydraulique (LNH) d'EDF dans les années 1980, dont les principaux résultats sont rappelés ci-dessous.

### 7.1. Etude sur modèle réduit physique – 1<sup>er</sup> rapport

La retenue de Grand Maison et le glissement du Billan ont été modélisés en similitude de Froude à l'échelle 1/200<sup>e</sup>. La rampe de glissement est constituée d'un bâti métallique garni de rouleaux cylindriques montés sur roulements. Chaque mobile est solidaire d'un treuil de relevage et d'un potentiomètre à tambour, par l'intermédiaire d'un câble mouflé. Ce dispositif permet la mise en place de contrepoids destinés à régler la vitesse de chute. La mesure du déplacement du mobile est déduite de la variation de tension aux bornes du potentiomètre.

Les mobiles se présentent sous forme de sacs en grillage métallique à mailles fines renfermant des cailloux (1cm < d < 6cm). Les dimensions des sacs (avant déformation par les essais) sont indiquées ci-dessous :

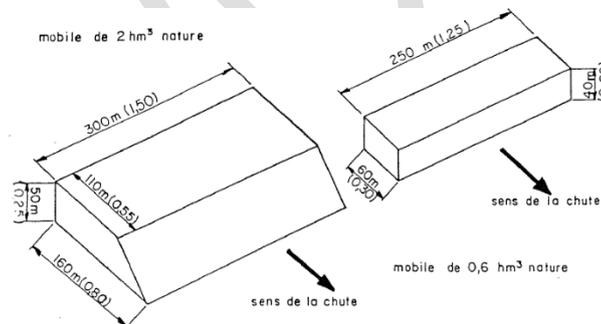


Figure 11 : Caractéristiques des mobiles du modèle réduit

La représentativité du glissement du Billan par ces mobiles n'est pas justifiée en termes de déformabilité et de densité. La densité doit en particulier tenir compte de la cohésion des matériaux du glissement, puisqu'au fur et à mesure de son déplacement des vides d'air vont apparaître. Les mobiles de ce premier modèle sont déformables mais les grillages ne permettent pas de reproduire complètement le glissement. Le diamètre des matériaux est indiqué, mais sans faire de comparaison avec ceux du glissement. La largeur et l'épaisseur de ces mobiles sont similaires à celles estimées aujourd'hui (respectivement 300m et 45m d'après §3 et §3.1.2).

Les paramètres d'entrée des essais sont les suivants :

Vitesse	Volume	Niveau de retenue
Entre 10 et 30 m/s	0,6 à 2hm <sup>3</sup>	Entre 1680 et 1695m NGF O

Figure 12 : Principaux paramètres du modèle

Le rapport précise que la cote initiale de la retenue n'a pas d'influence significative sur les hauteurs de vague. Avec une cote de départ à 1695 m NGF O (cote de Retenue Normale) une surverse sur le barrage de Grand Maison apparaît à partir d'une vitesse voisine de 15 m/s.

### 7.2. Etude sur modèle réduit physique – 2e rapport

Pour ce modèle réduit, la crête a été modifiée pour être conforme aux plans de construction. En particulier la prise en compte de la cote du couronnement du barrage, qui augmente progressivement de 1700,08m NGF O en rive gauche à 1701,07m NGF O en rive droite. La mesure de la vitesse du glissement est améliorée, en augmentant la vitesse de l'enregistreur graphique du déplacement du mobile. A cela s'ajoute deux cellules photo-électriques espacées de 0,25m à la base de la rampe de glissement. Elles permettent une estimation de la vitesse moyenne à proximité immédiate de l'impact dans l'eau, qui est comparée avec celle du potentiomètre. Les auteurs estiment que l'erreur sur la mesure de la vitesse est divisée par 3 par rapport aux essais précédents. Un dispositif de mesure du volume déversé est ajouté.

En plus des mobiles en gabions présentés utilisés dans les essais précédents, des mobiles en Rhodorsil parallélépipédiques et lestés de plomb sont testés. Leurs dimensions sont indiquées dans le tableau suivant :

Dénomination du mobile	Largeur représentée	Epaisseur représentée	Volume représenté
Rhodorsil juxtaposé	300 m	25 m	2 hm <sup>3</sup>
Rhodorsil superposé	300 m	50 m	2 hm <sup>3</sup>

Figure 13 : Dimensions des mobiles en Rhodorsil

La représentativité du glissement du Billan par ces mobiles en Rhodorsil n'est pas justifiée, cependant leur densité de 1,8 correspond à celle du glissement du Billan, après la prise en compte de la porosité du glissement. La largeur de 300m correspond à celle du glissement estimée aujourd'hui, ainsi que l'épaisseur dans le cas du mobile superposé.

A 10 m/s aucun déversement n'est observé sur le barrage avec les mobiles en gabion ; pour les mobiles en Rhodorsil celui-ci n'est pas significatif, ainsi aucun volume n'est indiqué ni aucun temps de surverse.

### 7.3. Etude sur modèle réduit physique – 3e rapport

Dans ce 3<sup>e</sup> rapport, le modèle physique est le même que celui utilisé dans le rapport précédent. La mesure de vitesse a encore été améliorée : l'enregistrement graphique du déplacement du mobile a été remplacé par un enregistrement sur un calculateur digital, avec filtrage des parasites. Les cellules photo-électriques servent maintenant à repérer l'arrivée du mobile dans l'eau, et pas uniquement à mesurer une vitesse moyenne. Cela amène à identifier une discordance par rapport aux essais antérieurs, où le moment de l'impact était défini par l'apparition d'une variation du niveau d'eau à faible distance (10 cm modèle soit 20 m nature). Pour la plupart des essais, le moment de l'impact dans la retenue correspondant à la nouvelle définition est antérieur à celui considéré précédemment. Les vitesses de glissement à l'impact données dans le 3<sup>e</sup> rapport sont à minorer d'environ 25% pour s'accorder avec l'ancienne définition.

Une vitesse de 10 m/s dans le 2<sup>e</sup> rapport correspond à une vitesse de 13,3m/s vu du 3<sup>e</sup> rapport. Avec cette conversion, les résultats du 2<sup>e</sup> rapport qui nous intéressent deviennent :

Mobile	Gabion 0,6 hm <sup>3</sup>	Gabion 2hm <sup>3</sup>	Rhodorsil 2hm <sup>3</sup> juxtaposé	Rhodorsil 2hm <sup>3</sup> superposé
Cote atteinte (m NGF O)	1699,20	1699,80	1700,40	1700,60

Figure 14 : Résultats du rapport n°2 à la vitesse corrigée de 13,3m/s, cote de départ à 1695m NGF O

Les valeurs en italique et rouge signifient qu'un déversement a été observé lors des essais : cela correspond à des déversements en rive gauche, car la cote du couronnement y est inférieure à celles des cotes atteintes (1700,08m NGF O), alors qu'en rive droite le couronnement a une cote supérieure (1701,07m NGF O).

L'objectif de l'étude menée en 2024 est de démontrer que les résultats présentés dans la *Figure 14* ~~Figure 15~~ constituent un cas de calage pour la méthodologie développée par l'OFEN et présentée ci-après. Cela permettra ensuite d'estimer les vagues induites par le glissement du Billan, avec ses caractéristiques actualisées.

#### 7.4. Application de la méthodologie développée par l'Office Fédéral de l'Energie (Suisse)

Sur la base des estimations des caractéristiques du glissement indiquées plus haut, l'analyse des potentiels impacts induits par vagues sur le barrage est menée selon une méthodologie développée par l'Office Fédéral de l'Energie (OFEN) en Suisse. Cette méthodologie permet d'estimer les vagues produites dans les retenues de barrages consécutivement à des glissements de terrain, chutes de glace ou des avalanches et d'en évaluer les impacts sur le barrage (run-up, volume potentiellement déversé à l'aval). Le guide méthodologique et la feuille de calcul associée ont été actualisés en 2019 (seconde version).

L'appréciation des potentiels impacts induits par des vagues sur le barrage selon la méthodologie développée par l'OFEN est menée selon deux étapes successives :

- Le calcul des caractéristiques des vagues générées par l'impact du glissement de terrain et propagées jusqu'au barrage,

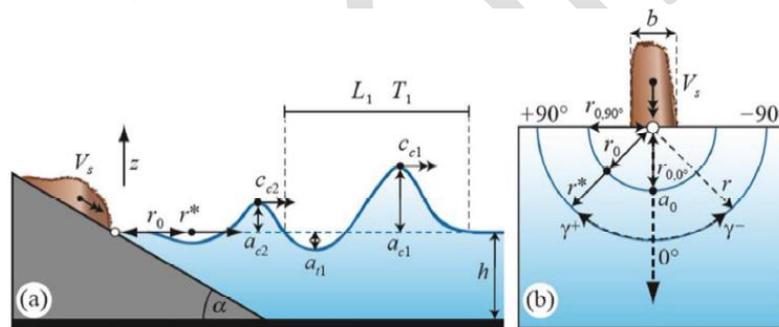


Figure 15 : Schéma des principaux paramètres de calcul de la génération et propagation des vagues dans la retenue

- Le calcul de l'impact des vagues en parement amont de l'ouvrage et des caractéristiques du déversement potentiel à l'aval du barrage (hauteur, volume, durée de surverse) consécutivement à la propagation des vagues en direction du barrage.

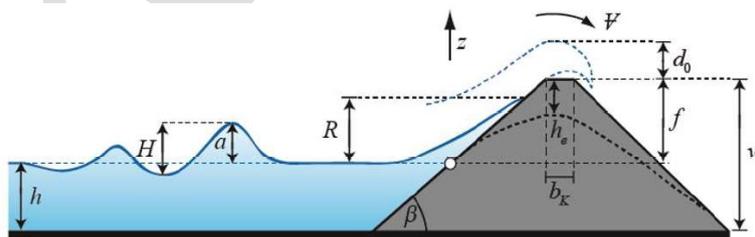


Figure 16: Schéma des principaux paramètres de calcul du run-up et de la surverse au barrage

Pour l'estimation des caractéristiques des vagues et du run-up au barrage, ainsi que l'évaluation des déversements potentiels, 4 points de run-up sont définis au barrage :

1. Point RG en rive gauche du barrage,
2. Point C au centre du barrage,
3. Point RD en rive droite du barrage,
4. Point EVC en rive gauche sur le seuil de l'EVC.

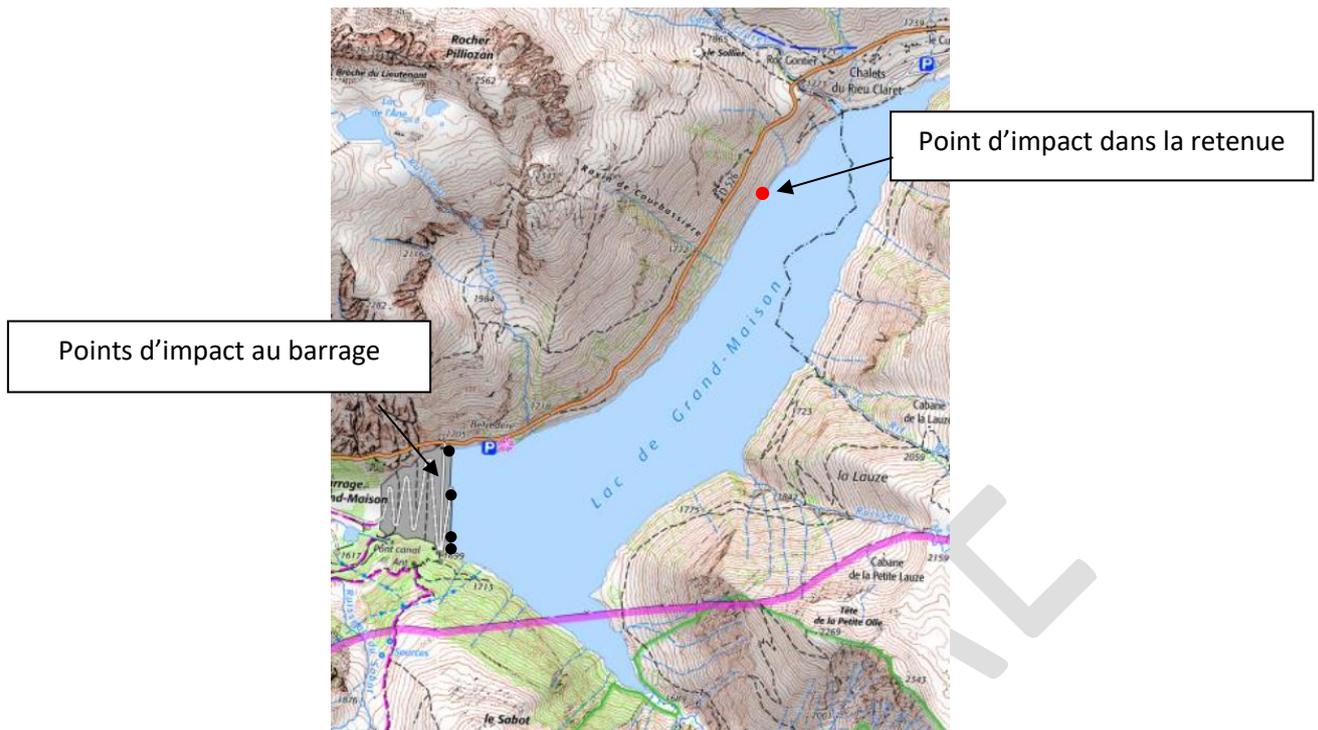


Figure 17 : Localisation du point d'impact du glissement du Billan dans la retenue de Grand Maison et des points de calcul au barrage

La propagation de vague due au glissement du Billan est découpée en deux phases selon la méthodologie OFEN :

- La première phase est une propagation 3D,
- La seconde phase est une propagation 2D.

En considérant un glissement de  $2\text{hm}^3$  et une vitesse de  $13,3\text{m/s}$ , la cote atteinte obtenue avec la méthodologie de l'OFEN est d'environ  $1700,50\text{m NGF O}$  en rive gauche. Ce résultat prend en compte la majoration d'un facteur 1,7 proposée par l'OFEN, qui s'applique sur le run-up. Cette valeur est intermédiaire entre celles obtenues pour un glissement de caractéristiques similaires avec les mobiles en Rhodorsil juxtaposés ( $1700,40\text{m NGF O}$ ) et superposés ( $1700,60\text{m NGF O}$ ) (Figure 14 Figure 15).

Ce constat est donc un calage de la méthodologie développée par l'OFEN pour le cas du glissement du Billan. Il est ensuite possible d'estimer les conséquences du glissement de terrain avec ses caractéristiques ré-estimées (paragraphes 5 et 6), voisines de celle du cas de calage : vitesse de l'ordre de  $10\text{m/s}$ , largeur de  $300\text{m}$ , épaisseur de  $45\text{m}$  et volume de  $1\text{hm}^3$ .

Les résultats sont :

- L'absence de surverse sur le barrage, avec une retenue à la Retenue Normale  $1695\text{m NGF O}$ ,
- Une surverse au niveau de l'évacuateur de crue situé en rive gauche.

### 7.5. Analyse et résultats

L'étude des vagues induites par le glissement du Billan a pu être mise à jour pour les raisons suivantes :

- La ré-estimation des caractéristiques du glissement, en particulier son volume et sa vitesse qui sont les paramètres les plus significatifs sur la génération de vagues,
- L'analyse des modèles réduits réalisés dans les années 1980 sur le glissement du Billan, en tenant compte des modifications successives des moyens de mesure et de la représentation du glissement.

Ce travail a permis d'identifier des essais sur modèle réduit, pour lesquels la cote atteinte correspond à celle obtenue pour un cas similaire avec la méthode développée par l'OFEN. On obtient ainsi un cas de calage de cette méthode, à partir duquel la cote atteinte peut être estimée avec les caractéristiques du glissement mises à jour.

## 8. CONCLUSION

En levant certains conservatismes liés aux données d'entrées (piézométrie stabilisée depuis plusieurs dizaines d'années sous le niveau pris à l'époque pour les calculs, volume arrivant dans la retenue rationalisé et vitesse de glissement retenue raisonnablement prudente), ainsi qu'en utilisant les nouvelles règles de l'art dans le domaine du calcul de vague suite à un glissement de terrain, il a été démontré :

- Que les marges de stabilité sur le glissement sont acceptables quelles que soient les situations réglementaires,
- Que les marges de stabilité les plus faibles sont en cas de séisme,
- Qu'en cas de glissement du Billan dû à un séisme, la vague induite dans la retenue de Grand Maison ne se traduirait par aucune surverse sur le barrage.

Au vu de l'ensemble de ces éléments, la contrainte de cote actuellement en place ne semble plus adaptée au risque.

## REMERCIEMENTS

Nicolas Muller pour sa disponibilité et sa connaissance pointue de l'aménagement.

Jean Yves Dubié, géologue retraité ayant suivi la construction de Grand Maison, pour avoir pris le temps de nous accompagner sur site et nous faire partager ses connaissances sur le glissement et le barrage de Grand Maison.

Lucas Demarty et Gilles Cognet pour leur aide précieuse dans la compréhension de l'affaire grâce à leur modèle 3D.

## RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] ATB

[2] Grand Maison – Glissement du Billan – Analyse de la stabilité dans le cadre de l'EDD – H-30575707-2024-000048

[3] Note EDF DT HY Etude de vagues induites par un glissement de terrain H-30575706-2024-000031

[4] Barrage de Grand Maison – Etude des mouvements de terrain dans le cadre des PPI (EFTGG/96-140-A)

[5] Modélisation des ruptures de barrages issus de glissements de terrain – Rapport définitif de Décembre 2019 – Ministère de la transition écologique et solidaire

[6] Landslide-generated Impulse Waves in Reservoirs - Basics and Computation. Eigenverlag der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, Swiss Federal office of Energy SFOE.

[7] Article CFBR 2016 – Evaluation du risque induit par les glissements de terrain : du modèle géologique aux estimations de hauteurs de vague et risque pour le barrage

[8] Aménagement de Grand'Maison – Glissement de la montagne de Billan – Compte-rendu n°1 à 3 d'essais sur modèle physique, EDF LNHE, référence HE/43/86.34

[9] Grand Maison, Etude de stabilité du Billan avec le code mathématique Talren 2 – E-REAL-EDF-87-009-B

[10] Glissement du Billan – MECASOL – Note N°1 – Réflexions sur la stabilité du glissement