

COMMISSION INTERNATIONALE  
DES GRANDES BARRAGES

-----  
VINGT SIXIÈME CONGRÈS  
DES GRANDS BARRAGES  
*Vienne, Juillet 2018*  
-----

**RISK INDUCED BY LANDSLIDE – FROM GEOLOGICAL MODEL TO IMPULSE  
WAVE HEIGHT AND DAM RISK\***

François VAYSSE, Gilbert CASTANIER  
*Chef de groupe, expert, EDF CEIDRE TEGG*

Thomas VIARD, Olivier CHULLIAT, Denis AELBRECHT  
*Chargés d'affaires, expert, EDF CIH*

FRANCE

SUMMARY

The landslide event at Chambon dam and reservoir reminds us that this phenomenon stands as one of main risks for dam safety. Risk associated to generation and propagation of landslide-induced impulse waves in reservoirs might have dramatic consequences around lake, for the dam itself, and also downstream as Vajont catastrophic event showed in 1963. Recent research and permanent improvement of modeling have provided better risk evaluation tools by linking geology and hydraulic physics.

Knowing characteristics of landslide impacting the reservoir by coupling it to geological model is necessary to evaluate wave risk. Geological model, velocity, material properties (granular or solid body) and geometric dimensions have a great influence on landslide-induced impulse wave characteristics. It is necessary to study and observe the (potentially) unstable mass to link it to geological landslide that will determine input data for the hydraulic study. With those input data, 2 tools can be used to estimate hydraulic risk taking into account remaining geological uncertainties on input data range (for instance for volume or velocity of the slide).

This general approach is applied and detailed for "Berche" landslide at Chambon Lake observed during summer 2015.

---

\* *Risque induit par les glissements de terrain – du modèle géologique aux hauteurs de vagues induites*

## RÉSUMÉ

Comme le rappelle l'actualité récente au réservoir du Chambon, les glissements de terrain peuvent constituer un enjeu majeur pour la sûreté de barrages. En effet, le risque lié à la génération et à la propagation de vagues dans les réservoirs par de tels glissements peut avoir des conséquences potentiellement dramatiques autour des retenues et à l'aval des réservoirs, comme au Vajont en 1963. Des outils récents issus de la recherche et des efforts d'amélioration de la modélisation des phénomènes permettent une meilleure évaluation de ce risque en liant la géologie et l'hydraulique.

Pour évaluer le risque de vague, il est nécessaire de connaître les caractéristiques de la masse glissée à son entrée dans la retenue, en la rattachant à un modèle géologique de glissement. Ce modèle géologique, sa vitesse, son type (monolithique ou granulaire) et ses dimensions ont une incidence fondamentale sur les caractéristiques de vagues induites par le glissement. Il est ainsi nécessaire de réaliser des études et des observations de terrain pour rattacher la masse instable, ou potentiellement instable, à un modèle géologique de glissement pour prévoir au mieux ces éléments qui sont utilisés en données d'entrée d'une étude hydraulique. Une fois le modèle géologique de glissement établi ainsi que ses caractéristiques les plus probables, EDF a développé et retenu deux outils pour évaluer le risque hydraulique, sachant que les incertitudes géologiques éventuelles résiduelles, après l'étude de terrain, seront paramétrées dans le modèle numérique de calcul de vague en prenant des fourchettes de valeurs par exemple pour le volume glissé, la vitesse d'arrivée dans le lac, etc...

Cette approche est détaillée pour le cas du glissement de terrain de la Berche au-dessus du lac du Chambon, observé lors de l'été 2015.

### 1. CONTEXTE

En 2015, le glissement de terrain de la Berche s'est mis en mouvement au-dessus de la retenue du Chambon. Cet événement a été l'occasion pour EDF de mettre à l'épreuve ses connaissances et son savoir-faire concernant l'évaluation du risque induit par les glissements de terrain.

### 2. INTRODUCTION SUR LES GLISSEMENTS DE TERRAIN ET LES INSTABILITES DE VERSANTS

#### 2.1. UNE EXPÉRIENCE DE LONGUE DATE

Du fait de l'importance de son parc hydraulique (68 PPI et 255 mouvements de terrains potentiels ou actifs), comportant quelques sites sensibles, EDF

## C. 2

possède une longue expérience dans la gestion des mouvements de versants, tant lors de la première mise en eau, que pendant l'exploitation. Cette expérience couvre la gestion de mouvements de terrains déclarés et la gestion préventive de glissements potentiels susceptibles de mettre à mal la sûreté des ouvrages.

Au cours des années 2000, cette expérience s'est enrichie du fait des acquisitions par EDF d'aménagement hydroélectriques en Argentine, dans les Andes où les retenues sont implantées dans des formations volcaniques et volcano-sédimentaires hétérogènes et affectées par de nombreux glissements (Los Reyunos en 2002).

### 2.2. LES PARAMÈTRES CONDITIONNANT LE RISQUE DE VAGUE DANS UN RÉSERVOIR DE BARRAGE

Il s'agit toujours de la combinaison de paramètres physiques et géologiques intimement mêlés. Pour la physique, c'est l'énergie potentielle accumulée qui résulte de l'histoire géologique de la chaîne de montagne, de l'érosion des versants par les glaciers au cours de l'ère Quaternaire, des pentes de la vallée qui en résultent et qui s'accroissent avec l'enfoncement du lit de la rivière au fil du temps. L'énergie potentielle accumulée est représentée par le volume de la masse instable, de sa position en altitude, et de la hauteur de chute pour passer d'un état d'équilibre instable à un état plus stable.

Au cours du mouvement, une partie de l'énergie potentielle est transformée en énergie cinétique ; l'autre partie est dissipée sous forme de chaleur par le frottement le long de la surface de glissement.

S'agissant du lien entre la masse instable et la hauteur de la vague générée, on retrouve donc la vitesse de son arrivée dans la retenue. L'autre paramètre physique en regard du risque de vague est le caractère monolithique de la masse instable qui crée un « effet de piston » sur la masse d'eau du réservoir ou, au contraire, son caractère fragmentaire qui supprime l'effet de piston et permet la dissipation dans l'eau d'une grande partie de l'énergie cinétique par « effet de splash ».

### 2.3. DÉMARCHE GLOBALE À EDF POUR APPRÉHENDER UN GLISSEMENT DE TERRAIN

La démarche débute toujours par une étude géologique précise dont les objectifs sont multiples : a) déterminer les caractéristiques géométriques de la zone instable (surface et volume) ; b) évaluer les éléments topographiques pour apprécier l'énergie potentielle accumulée au niveau de la zone instable et pour apprécier l'énergie cinétique mobilisable ; c) déterminer la nature géologique des

formations instables de façon à en apprécier la cohésion ; d) apprécier le caractère monolithique ou, au contraire, très fragmentaire de la zone instable; e) rechercher l'existence ou non de surfaces de glissement; f) comprendre l'hydrogéologie du massif ;

L'objectif est de « typer » la zone instable de façon à la rattacher à un type de glissement connu de façon à évaluer l'ordre de grandeur de la vitesse de glissement lors de son arrivée dans le lac et estimer l'ordre de grandeur de la hauteur de la vague créée, ainsi que la remontée de cette vague sur les berges et le barrage (le « run-up »). Il s'agit aussi d'apprécier le caractère en cours, ou plus ou moins imminent, de l'instabilité du mouvement de terrain.

Le diagnostic géologique peut conclure à l'innocuité de la zone instable, ou à sa dangerosité. Il peut aussi conduire à une demande d'auscultation, des reconnaissances, des calculs de stabilité plus ou moins sophistiqués, des travaux (création de butées de pied ou drainage, en surface ou par des drains forés à partir de galeries).

### 3. LES TYPES DE MOUVEMENTS DE TERRAINS EN REGARD DU RISQUE DE VAGUE

En terme de vitesses on distingue deux grandes catégories : celle où le frottement interne est maximal et où l'essentiel de l'énergie potentielle se dissipe en chaleur (à gauche de la Fig. 1) et celle où le frottement interne est minimal et où l'essentiel de l'énergie potentielle se transforme en énergie cinétique (à droite de la Fig. 1).

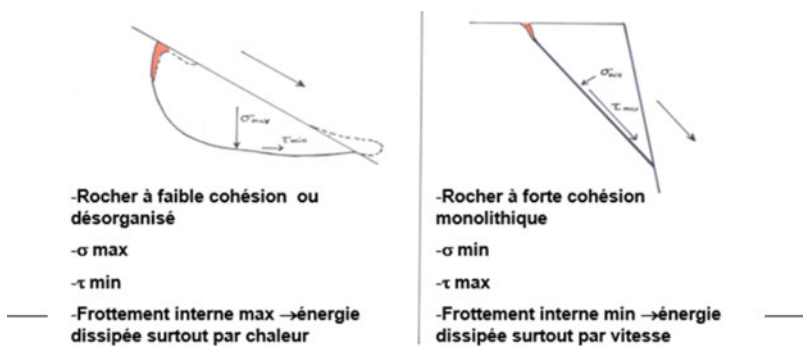


Fig. 1

Les deux grandes catégories de mouvements de terrains en terme de vitesses  
*2 kinds of landslide with different order of magnitude of speed*

## C. 2

A côté des coulées de boue et des chutes de blocs qui, en général, ne concernent que de faibles volumes sauf cas particuliers, les mouvements de terrain peuvent être répertoriés selon les principaux types suivants : Les mouvements monolithiques à vitesses lentes, dans des matériaux à faible cohésion (argiles) ou dans des versants rocheux désorganisés : glissements anciens, fossiles ou fauchés (Fig. 2-A et 2-B). Par contre, dans les matériaux à forte cohésion, on rencontre les effondrements de falaises suite à un cisaillement du pied ; le volume se fragmente en cours de chute et ne peut donc générer de grosse vague dans un réservoir (Fig. 2-C). A l'opposé, les basculements de falaises résultant de la compression d'une couche « molle » en pied, restent monolithiques et peuvent générer une grande vague si le volume est grand (Fig. 2-D). Enfin, si le volume est grand, le type le plus dangereux est le glissement par décohésion de « banc sur banc » dont l'exemple le plus spectaculaire et le plus « triste » reste celui de Vajont dans les dolomites italiennes (Fig. 2-E).

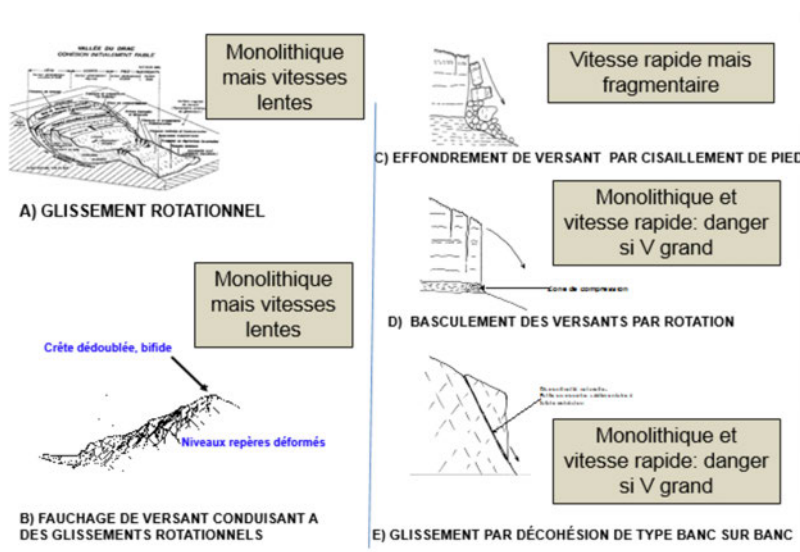


Fig. 2  
Les principaux types de glissements de terrain  
*Main kinds of landslides*

Quelques illustrations géologiques dans la Fig. 3 ci-dessous :

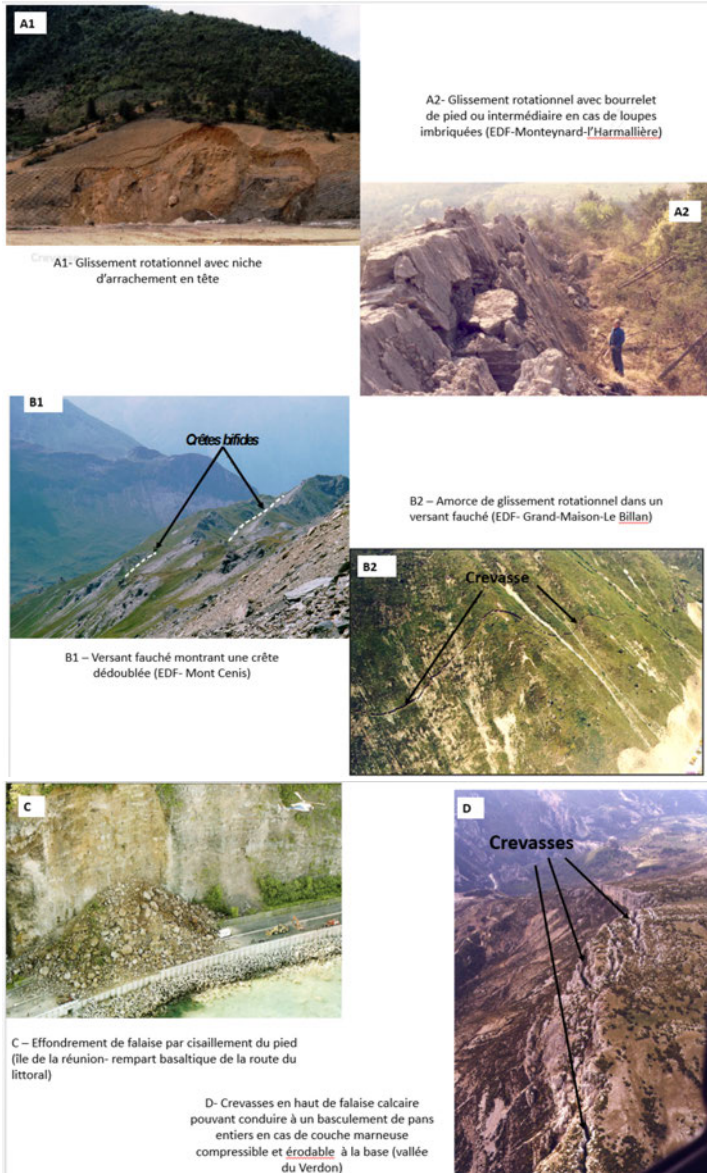


Fig. 3

Photos de glissements et de configurations géologiques rattachées à ces glissements

*Photos of geological configurations and induced landslides*

## C. 2



Fig. 3  
(Continued)

Fig. 3-A1 : Petit glissement rotationnel dans de la latérite argileuse (STEP de Guanzhou-Chine) ; Fig. 3-A2 : Bourrelet de pied d'une loupe de glissement dans une série de loupes imbriquées ; Fig. 3-B1 : Crête dédoublée, bifide, au sommet d'un versant fauché ; Fig. 3-B2 : amorce d'un glissement rotationnel dans un versant fauché (Billan – Grand maison) ; Fig. 3-C : Effondrement de falaise par cisaillement de pied (rempart basaltique – Ile de la réunion) ; Fig. 3-D : Crevasses de sommet de falaise pouvant constituer un indice de basculement de grande ampleur ; Fig. 3-E1 : Configuration géologique de type banc sur banc ; Fig. 3-E2 : Couche argileuse interstratifiée dans une puissante série calcaire – glissement : Vajont à proximité de la surface de glissement (photo Hendron et Patton) ; Fig. 3-E3 : Glissement du Vajont.

L'écrasante majorité (environ 75%) des glissements de terrains de grande dimension, correspondent à des réactivations de glissements anciens, « fossiles »

résultant de l'érosion des versants par les glaciers au cours de l'ère Quaternaire puis de leur fonte entre -20 000 ans et - 10 000 ans, quand la glace qui soutenait les versants, a disparu. A ce titre, ces glissements qui concernent des rochers remaniés, à faible cohésion, sont de type rotationnels. Quand ils sont réactivés, à l'exception de la chute brutale de faibles volumes, leur vitesse de glissement est faible (quelques cm par jour ou par semaine) et ne peuvent générer de grande vagues quand ils arrivent dans une retenue.

Le glissement de la Berche, dont les caractéristiques sont décrites ci-après, est à rattacher à ce type d'instabilité.

## 4. LE GLISSEMENT DE LA BERCHE

### 4.1. RAPPEL DES ÉVÉNEMENTS

Le glissement de la Berche a été découvert le 10 avril 2015 lors d'une inspection du versant par un géologue territorial du Conseil Départemental de l'Isère (CD38). La longueur de la niche d'arrachement découverte ce jour-là correspondait à peu près à l'emprise finale du glissement tel que connu à ce jour, avec un décrochement vertical d'environ un mètre. Cet examen de terrain faisait suite à l'accélération des désordres constatés depuis quelques jours au niveau de la voute du tunnel du Grand Chambon entre les PM 60 et 80 (entrée amont). A noter que l'instabilité observée dans le tunnel ne date pas d'hier, car les premiers travaux de confortement de la voûte datent de la fin des années 1970, et des instabilités à répétition ont été constatées depuis au même endroit. Dans les semaines qui suivirent la découverte, les déplacements du glissement ont conduit à la ruine du tunnel entre les PM 60 et 80.

La route départementale RD1091 fut fermée à la circulation à partir de la découverte du glissement, avec comme conséquence l'isolement de nombreux usagers dans cette partie enclavée du département de l'Isère, et ceci pour une période de plusieurs mois. Par ailleurs, le pied du glissement étant baigné par la retenue du barrage de Chambon (cote de retenue aux alentours de 1006 à 1010 NGF en avril 2015 pour une RN à 1040 NGF), EDF et les services compétents de l'Etat (DREAL et Préfecture) prirent la décision de différer la remontée programmée du plan d'eau dans le cadre de la qualification de sa nouvelle membrane d'étanchéité.

Le glissement fut équipé par le CD38, dans les jours et semaines suivant sa découverte, d'un système d'instrumentation en temps réel, composé de fissuromètres et de cibles topographiques mesurées à l'aide d'un théodolite automatisé situé sur la rive opposée de la retenue.



## C. 2

### 4.2. LE MODÈLE GÉOLOGIQUE

L'ensemble du versant auquel appartient le glissement de la Berche est à l'évidence à sa limite d'équilibre et ce fait avait déjà été identifié lors des précédentes études PPI d'EDF :

- les schistes du Lias, de piètre qualité géomécanique, sont réputés dans toutes les Alpes avoir produit de nombreux « paquets glissés » après la période glaciaire,
- la vallée porte les stigmates d'une érosion glaciaire, récente à l'échelle des temps géologiques, qui a conduit probablement à le fragiliser ; du fait d'une pente topographique relativement raide et notamment parce que le toit rocheux plonge fortement sous les alluvions de la Romanche du fait d'un surcreusement glaciaire probable.

Le massif rocheux est déstructuré et décomprimé (présence de failles, d'argile, de fissures ouvertes) probablement depuis ces temps glaciaires, puisque ces indices géologiques :

- ont été relevés lors du percement du tunnel routier, notamment entre les PM 30 et 160,
- sont observés en partie haute du glissement, au niveau de la partie Est de la niche d'arrachement (discontinuité largement ouverte, préexistante, de pendage 65-75° en direction de la retenue, d'azimut sensiblement perpendiculaire à la stratification).

La stratification, qui constitue de loin la famille de discontinuité la plus représentée et la plus structurante pour le massif rocheux, est d'orientation sensiblement NS, avec un pendage moyen de de 50° vers l'Est (Fig. 4). Avec un versant orienté sensiblement EW, les joints de stratification n'apparaissent pas à première vue comme particulièrement défavorable à la stabilité d'ensemble ; néanmoins, le versant apparaît proche de sa limite d'équilibre; la réactivation pouvant être liée à plusieurs phénomènes déclencheurs mineurs : fonte nivale, séisme ou plus probablement par fatigue des matériaux rocheux.

Du point de vue de l'hydrogéologie, le massif rocheux paraît très perméable et le tunnel, majoritairement non revêtu, joue un rôle de drain du versant, écrêtant le gonflement piézométrique de la nappe fissurale.

Le glissement apparaît en partie supérieure sous la forme d'un volume de terrain qui se rapproche de la forme d'un « grand dièdre », résultat de la conjonction de deux grands plans :

- un plan Est qui correspond à une discontinuité préexistante ouverte et remplie de matériaux meubles. L'examen de détail de cette discontinuité laisse penser à une ancienne surface de rupture (une « paléo-crevasse », proba-

blement d'origine glaciaire). Cette surface de rupture se propage en profondeur avec un pendage accentué en direction de la retenue. Une projection en profondeur de cette discontinuité amène la discontinuité au niveau du tunnel. Ainsi, il n'est pas exclu que cette discontinuité puisse être à l'origine des désordres observés lors du percement du tunnel, entre les PM 30 et 160. D'autres plans de ce type, sensiblement parallèles à ce plan Est, sont observés dans le corps du glissement,

- un plan Ouest, plus irrégulier, composite, constitué par la prise en relais de joints de stratification et de surfaces d'arrachement (de telle sorte que ce plan présente une forme « crénelée »).

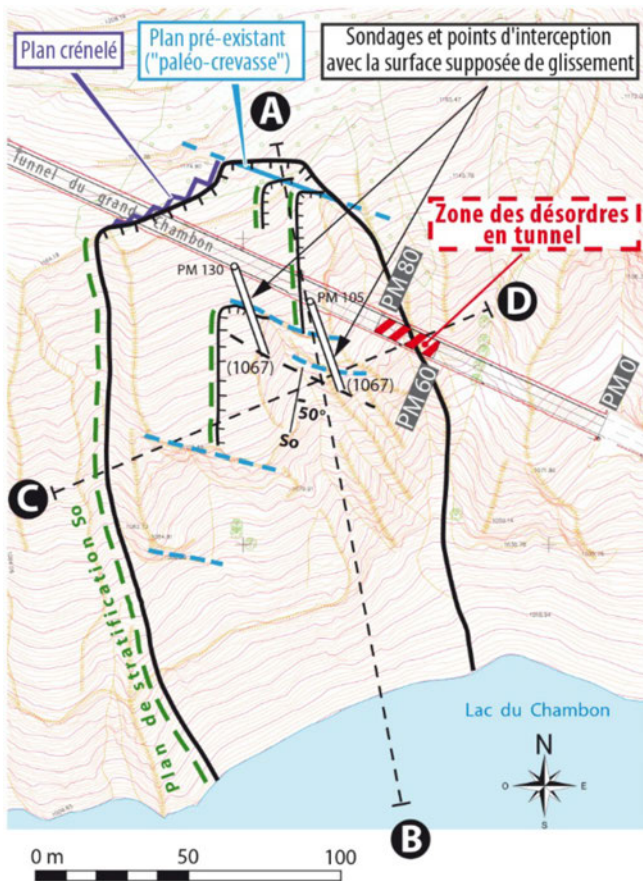


Fig. 4  
 Vue en plan du glissement de la Berche  
*Berche landslide's plan view*

## C. 2

L'arête de ce « grand dièdre » formé par la conjonction de ces deux grands plans, pourrait se poursuivre jusqu'à la profondeur du tunnel. Au sein de ce « grand dièdre », de plus petits dièdres s'individualisent. Ils sont formés par la conjonction des joints stratigraphiques avec une famille de discontinuités sensiblement parallèles à la « paléo-crevasse » observée à l'Est de la niche d'arrachement.

Dans la moitié inférieure du glissement (sous la cote du tunnel), la surface de glissement traverse le massif rocheux en empruntant une succession de joints rocheux plus ou moins continus. Cette moitié inférieure du glissement se rapproche d'un glissement de type « rotationnel » à grand rayon de courbure (les joints stratigraphiques semblent jouer encore un rôle important dans le mécanisme de cette moitié inférieure de glissement, et guident préférentiellement cette surface de rupture, dont la pente se conforme au pendage apparent des joints de stratification).

On distinguera donc :

- Au sein de ce grand glissement, des glissements superficiels guidés structuralement (petits dièdres), pour des volumes unitaires de quelques dizaines de milliers de m<sup>3</sup>. Ces glissements superficiels coiffent la partie haute du glissement d'ensemble et évoluent de manière régressive, un petit glissement en appelant un autre, le tout échelonné dans le temps,
- un glissement d'ensemble, plus profond, sous la forme d'un « grand dièdre » dans sa partie supérieure, et avec une ligne de cisaillement « traversant » le massif rocheux dans sa partie inférieure.

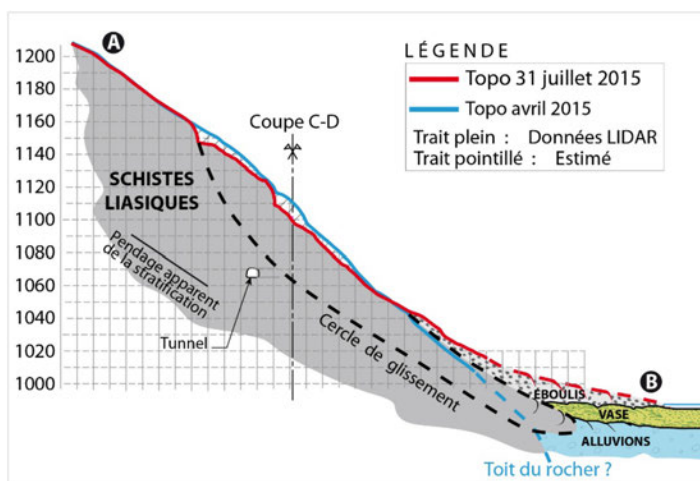


Fig. 5  
Coupe AB du glissement de la Berche  
Cross section AB of the Berche landslide

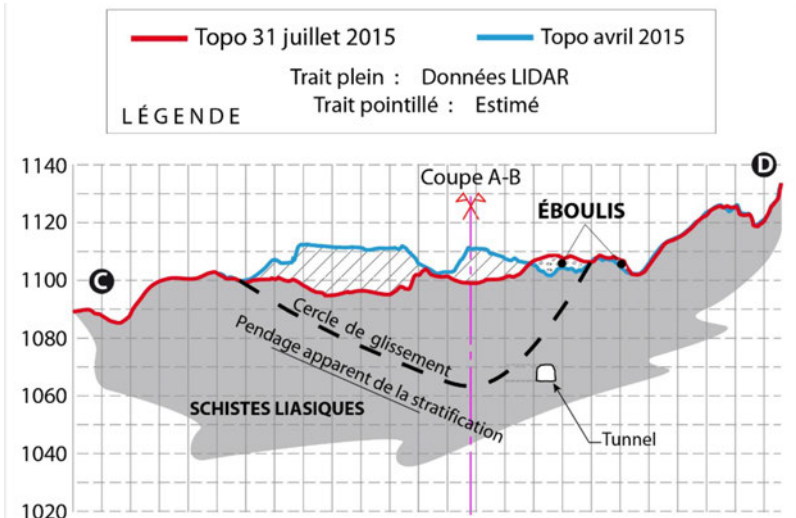


Fig. 6  
Coupe CD du glissement de la Berche  
*Cross section CD of the Berche landslide*

Les vecteurs déplacements présentent une inclinaison subparallèle au terrain naturel, qui traduit un cisaillement le long d'une surface à grand rayon de courbure, donc relativement plane (probablement guidée par le pendage apparent de la stratification), permettant de considérer une épaisseur de terrain glissé relativement modérée, comparativement à la hauteur du glissement. Les coupes géologiques conduisent à considérer une épaisseur maximale de 30 m environ au niveau de l'altitude du tunnel. Une estimation réaliste du volume du glissement avec l'hypothèse d'une ligne de cisaillement débouchant à la cote 975 NGF (soit le toit approximatif supposé des alluvions), et d'une épaisseur de l'ordre de 10 m au niveau de la cote 1010 NGF, conduit à considérer un volume d'environ 500 000 à 600 000 m<sup>3</sup>. Un scénario sécuritaire conduirait à considérer un volume de 800 000 m<sup>3</sup>.

#### 4.3. L'ÉPISODE PAROXYSTIQUE DES 4-5 JUILLET 2015

Pendant la période allant de la découverte du glissement à l'épisode paroxystique des 4-5 juillet, le plan d'eau du barrage de Chambon a été maintenu constant et bas, aux alentours de la cote 1010 NGF. Dans ces conditions, et sans épisode pluvieux particulier, l'évolution du glissement d'ensemble s'est faite graduellement, avec notamment une fissure latérale Ouest se propageant avec le

## C. 2

temps de haut en bas. Une accélération des déplacements est notée à compter de la mi-juin (vitesse de l'ordre de 20 cm/jour, avec un paroxysme atteint les 4 et 5 juillet (vitesse proche d'un mètre par jour).

Les déplacements observés traduisent sans aucun doute :

- une propagation de la ligne de cisaillement à la partie inférieure du glissement, et une rupture maintenant généralisée de l'ensemble du glissement y compris dans son pied,
- un passage de caractéristiques de « pic » à des caractéristiques « résiduelles » le long de la surface de cisaillement.

En dépit de cette rupture du glissement d'ensemble, cet épisode paroxystique n'a pas produit d'éboulement en grande masse, mais seulement la purge, sous la forme d'éboulis, de volumes limités (pour un total de quelques dizaines de milliers de m<sup>3</sup>) coiffant la partie supérieure du glissement.



Fig. 7

Le glissement de la Berche au 21 juillet 2015  
*Berche landslide on 21th July 2015*

### 4.4. L'ÉPISODE PAROXYSTIQUE DES 25-26 JUILLET 2015

A la suite de l'épisode paroxystique des 4-5 juillet, les services de l'état (DREAL et Préfecture) ont proposé, avec l'aide des services d'EDF, du CEREMA, et du CD38 que le glissement d'ensemble soit accéléré en remontant rapidement le plan d'eau.

Comme prévu, la remontée du plan d'eau a bien produit un déplacement d'ensemble du glissement, avec un paroxysme atteint les 25-26 juillet, alors que

le plan d'eau était en phase de remontée avec une cote de l'ordre de 1013-1014 NGF. Lors de cet épisode, on observait:

- un déplacement pluri-métrique d'ensemble du glissement (sur des caractéristiques « résiduelles »),
- une nouvelle purge par éboulements des compartiments supérieurs pour un volume de quelques dizaines de milliers de m<sup>3</sup>.

Les deux phénomènes superposés à l'origine de ces déplacements sont une diminution des contraintes effectives au niveau du pied du glissement (ce qui a pour effet de réduire les forces résistantes, concentrées à cet endroit), et une imbibition du massif rocheux qui produit un effet de « lubrification » au niveau des schistes broyés et argilisés de la ligne de cisaillement.

A la date du 31 juillet 2015, le déficit de volume en partie haute du glissement est de l'ordre de 84 000 m<sup>3</sup>. Ce volume correspond à la fois à un mouvement de rotation vers le bas du glissement d'ensemble, et à la production d'éboulis.

#### 4.5. LA REMONTÉE DU PLAN D'EAU AU-DESSUS DE 1015 NGF

L'épisode des 24-25 juillet 2015 a montré la sensibilité du glissement à la remontée du plan d'eau, et un fonctionnement typique d'un glissement « rotationnel », régi par des forces de frottement résiduelles, en limite d'équilibre, et réagissant aux moindres modifications des conditions aux limites (en l'occurrence ici, une remontée du plan d'eau).

Ce constat permettait, en théorie, d'éliminer le risque de mouvement d'ensemble de grande vitesse, à l'origine d'une possible vague de submersion du barrage du Chambon. Néanmoins, la pente topographique importante, le grand rayon de courbure du glissement (peu typique d'un pur « rotationnel », avec un guidage structural dans sa partie supérieure), ainsi que les enjeux de Sureté, engageaient à la prudence.

3 scénarii possibles d'évolution ont ainsi été échafaudés dans le cadre d'une remontée du plan d'eau au-dessus de 1015 NGF :

- scénario 1 : un scénario d'augmentation des vitesses du glissement d'ensemble qui resteraient toutefois dans la gamme de quelques décimètres à quelques mètres par heure. Une pseudo-stabilisation serait obtenue après un déplacement pluri-métrique du pied.
- scénario 1 bis : un scénario 1, avec en plus une purge par éboulement de la partie supérieure du glissement qui se produirait à nouveau par épisodes successifs (sur le même modèle que lors des deux épisodes paroxystiques de juillet 2015). Ces deux scénarii étaient de loin les plus probables et privilégiés, néanmoins, un scénario 2, correspondant à un glissement « rapide

## C. 2

- » avec production d'une vague, a été volontairement envisagé. Ce scénario maximaliste pouvait prendre différentes formes :
- (2-A) un glissement d'ensemble (pour un volume entrant dans l'eau de l'ordre de 150 000 m<sup>3</sup>) avec une vitesse qui resterait inférieure à 10 m/s,
  - (2-B) un éboulement en grande masse du compartiment perché (pour environ 50 000 m<sup>3</sup>), avec une vitesse maximale très conservatrice de 20 m/s (proche de la chute libre).

## 5. EVALUATION DU RISQUE DE VAGUE INDUITE

### 5.1. ETAT DE L'ART

#### 5.1.1. *Le monde de la recherche*

##### ***Les méthodes empiriques***

Les phénomènes induisant la formation d'une vague par un glissement de terrain sont complexes. Ainsi, les premières approches pour évaluer les risques furent les méthodes empiriques. Un certain nombre de recherches ont été effectuées à l'aide de bancs d'essais. Deux facteurs doivent être fixés en amont des expériences : le caractère monolithique ou granulaire (fragmentaire) du glissement et l'espace de propagation des vagues (canal – 2D ou bassin – 3D). Ainsi, en fonction des choix faits pour la construction du banc d'essai, différents travaux sont disponibles. Kamphuis & Bowering [6] se sont intéressés à la propagation d'une vague induite par un glissement monolithique dans un canal, là où Panizzo & al. [9] ont préféré regarder la propagation de ce type de glissement dans un bassin. Huber & Hager [5] se sont concentrés sur les glissements granulaires en canal et bassin et Heller [3] en canal en reprenant les formules de conversion établies par Huber & Hager pour étendre ses travaux à un bassin.

Ces travaux, notamment ceux de Heller permettent d'obtenir des hauteurs de vagues en bassin ou en canal à partir de quelques caractéristiques physiques du glissement à l'impact (vitesse  $V$  en m/s, épaisseur  $s$  en m, volume  $V$  en m<sup>3</sup>, largeur  $b$  en m, densité  $\rho$  en kg/m<sup>3</sup>) et du réservoir (profondeur  $h$  en m, pentes de berge en degrés). Toutefois, des éléments tels que les singularités de la géométrie réelle de la retenue et les phénomènes de réflexion ne peuvent être pris en compte par ce type d'approche.

##### ***Les modèles numériques***

Avec l'évolution des outils numériques et des moyens de calculs, certains travaux se sont intéressés à la possibilité de modéliser une vague induite par un glissement de terrain à l'aide d'outils de modélisation numérique. Par exemple,

certaines approches furent tentées en 2D à l'aide du logiciel Mike 21 [7] ou de Wolf 2D [1], ces modèles ont l'avantage de prendre en compte la géométrie de la retenue et les phénomènes de réflexion. Toutefois, certaines limites peuvent apparaître. Ces logiciels sont adaptés pour calculer des écoulements à l'aide des équations de Saint Venant ou de Boussinesq. Ainsi, des approximations sont faites dans les équations qui ne permettent pas de retranscrire au mieux les phénomènes de formation de la vague. En effet, la condition limite peut s'avérer difficile à modéliser (interaction glissement – eau). Les travaux de Fritz [2] sur le processus de formation de ce type de vague permettent d'évaluer le type d'impact (Fig. 8) en fonction du nombre de Froude\*\* (F) du glissement (1 – en abscisse) et de son épaisseur relative (S) (2 – en ordonnée) et ainsi d'évaluer le volume d'eau mis en mouvement par rapport au volume du glissement.

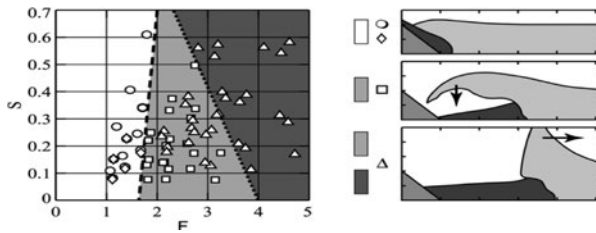


Fig. 8  
Types d'impact d'un glissement de terrain [2]  
*Landslide's impact kinds [2]*

$$F = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad [1]$$

$$S = \frac{s}{h} \quad [2]$$

Comme Kofoed-Hansen and al. [7], des modules complémentaires peuvent être programmés pour améliorer la modélisation de ce phénomène. Par ailleurs, des travaux aujourd'hui en cours envisagent l'utilisation, pour les glissements granulaires, des méthodes numériques de type smoothed particle hydrodynamics (SPH) utilisant des approches lagrangiennes prometteuses pour modéliser finement le processus de génération de vague et les interactions entre le glissement et l'eau en tenant compte des caractéristiques rhéologiques du glissement.

### **Les modèles réduits**

Historiquement, les modèles réduits ont et continuent de fournir des résultats fiables pour étudier des glissements de terrain particuliers ne pouvant être

\*\* Cette grandeur physique traduit le rapport entre l'énergie cinétique du glissement et l'énergie potentielle du lac



## C. 2

modélisé numériquement. Par exemple, le modèle réduit du glissement de terrain de Léaz dans la retenue de Génissiat [11] permet d'étudier le cas des glissements dans des retenues étroites où une vague n'a pas l'espace nécessaire pour pleinement se former et où les formules empiriques sont donc en limite d'applicabilité.

### 5.1.2. L'exploitation de ces recherches

En 2007 a eu lieu un glissement de terrain de 3 000 000 m<sup>3</sup> dans le lac Chehalis\*\*\* au Canada. De nombreuses données de calage sont disponibles sur ce glissement, notamment les hauteurs de « run-up » atteintes tout autour du lac. A partir de ce glissement et d'autres expériences sur d'autres glissements, une méthodologie a été adoptée apportant une réponse graduée pour l'étude des glissements de terrain. Cette méthodologie s'articule en deux étapes :

- Une méthode rapide d'évaluation d'un ordre de grandeur du risque : la méthode de Heller,
- Une méthode d'évaluation approfondie du risque : la modélisation 2D.

#### **Une méthode d'évaluation rapide – la méthode de Heller**

La méthode de calcul « de Heller » fait suite à trois thèses de l'ETH-Zurich (Suisse) étudiant les glissements de terrain : Hermann M. Fritz [2], Andreas Zweifel [10], Valentin Heller [3].

Ces trois thèses réalisées sur le même modèle physique (Fig. 9) ont permis d'établir des équations empiriques intégrées dans une feuille de calcul rapide de mise en œuvre. Ces équations s'appliquent aux glissements granulaires.

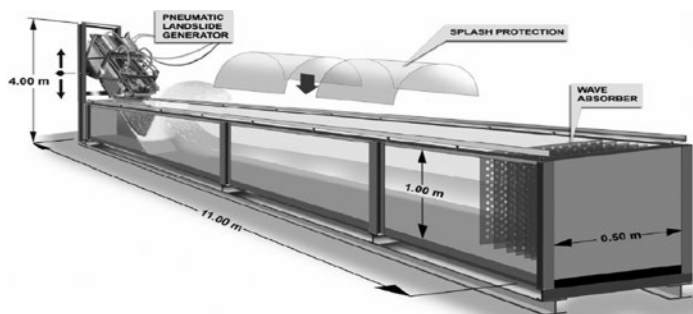


Fig. 9

Banc d'essai utilisé à l'université de Zurich [3]  
*Laboratory test device used at Zurich University [3]*

\*\*\* Lac naturel de 7 km de long dans l'axe nord-sud et de 1km de large. Sa profondeur est de l'ordre de 100 m.

Le banc d'essai a permis d'établir des équations empiriques en deux dimensions (propagation de la vague dans une seule direction horizontale guidée par des parois latérales, applicable dans un canal ou une retenue très allongée (Fig. 10- a)).

Les équations sont basées sur un paramètre d'impulsion  $P$  (3) dépendant du nombre de Froude ( $F$ ), de l'épaisseur relative ( $S$ ), de la masse relative\*\*\*\* ( $M = \rho V / \rho_{\text{eau}} b h^2$ ) et de la pente de la berge  $\alpha$ .

$$P = FS^{0.5} M^{0.25} \left[ \cos \left( \frac{6}{7} \alpha \right) \right]^{0.5} \quad [3]$$

Une première série d'équations, valides pour une large gamme des paramètres d'entrée, permet de connaître les caractéristiques de la vague au moment où elle atteint sa hauteur maximale :

- Le type de vague formée (solitaire, Stokes, mascaret, cnoïdale...),
- Son amplitude (au-dessus du niveau initial de la retenue)  $a = 4/5 * H$ ,
- Sa hauteur totale (du creux à la pointe de la vague)  $H = 5/9 * P^{4/5} h$ ,
- Sa période  $T = 9P^{1/2} \sqrt{h/g}$ , sa longueur d'onde  $L = Tc$  et sa célérité  $c = \sqrt{g(h+a)}$ ,
- La distance au point d'impact  $X_m$  à laquelle ces caractéristiques sont atteintes  $X_m = 11/2 * P^{1/2} h$ .

Une seconde série d'équations, détaillées dans [4] et [12], permet de connaître ces mêmes caractéristiques (amplitude, hauteur, période, longueur d'onde et célérité) à une distance  $x$  supérieure en prenant en compte l'atténuation de la vague due à sa propagation.

Pour une application aux lacs et retenues en général, les équations en deux dimensions ont été adaptées en trois dimensions (Fig. 10-b) par Heller & al. [4] à partir de la méthode de conversion de Huber et Hager [5].

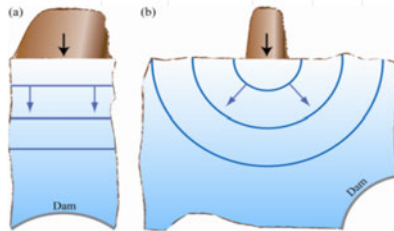


Fig. 10

(a) cas d'application en 2D ; (b) cas d'application en 3D  
(a) 2D example; (b) 3D example

\*\*\*\* b: largeur du glissement,  $h$  profondeur de la retenue dans l'axe du glissement et  $V$  volume du glissement

## C. 2

Cette méthode permet donc d'évaluer la formation de la vague puis sa propagation en canal ou bassin semi-infini. Ainsi, certains effets, par exemple la géométrie de la retenue et les réflexions possibles sur des berges ne sont pas pris en compte. C'est pourquoi, cette méthode ne peut fournir qu'un ordre de grandeur du phénomène.

Enfin, la méthode permet d'estimer le « run-up » (4) sur une berge (de pente  $\beta$  en degrés) ou un barrage à partir de l'équation de Müller [8], c'est-à-dire l'altitude atteinte par l'eau, ainsi que les efforts horizontaux et verticaux générés par l'effet dynamique de l'impact.

$$R = 1.25 \left( \frac{H}{h} \right)^{5/4} \left( \frac{H}{L} \right)^{-3/20} \left( \frac{90^\circ}{\beta} \right)^{1/5} h \quad [4]$$

Lors de travaux en 2010 dans le cadre du Dam Safety Interest Group (DSIG), cette méthode a été testée sur 6 cas répertoriés dans la littérature, puis a comparé les résultats de la méthode au modèle réduit de Grand Maison (via des données disponibles de laboratoire) et au cas de Chehalis Lake au Canada (données de terrain disponibles). Les équations de formation et de propagation de la vague ont fourni dans les cas testés des résultats d'un ordre de grandeur des hauteurs de vagues et de run-up jugé satisfaisant. Si la vitesse de glissement est bien connue, on peut espérer une hauteur de vague avec une précision entre 30 et 50 % avec cette méthode, la précision sur le run-up étant légèrement plus faible.

Ainsi, cette méthode est utilisée en adoptant des marges de sécurité, à caler en fonction de la nature des risques encourus et des enjeux. Ces marges de sécurité doivent couvrir les incertitudes associées à l'empirisme de la méthode, à la géologie liée au type de glissement, aux effets de topographie réelle du site et à la sensibilité des enjeux exposés au phénomène.

La méthode de Heller est adaptée aux glissements granulaires. Toutefois, les travaux de Zweifel [10] permettent à l'aide d'une formule empirique (5) de déterminer avec une bonne précision l'amplitude relative  $A_b$  ( $=ab/h$ ) de la vague induite par un glissement monolithique à partir du nombre de Froude et de l'amplitude relative  $A$  ( $=a/h$ ) de la vague induite par ce même glissement s'il était granulaire.

$$\frac{A_b - A}{A_b} = 1 - 0.26F \quad [5]$$

### ***Une méthode d'évaluation approfondie – la modélisation TELEMAC [13]***

Une méthode approfondie a été développée à l'aide du logiciel TELEMAC qui résout les équations de Barré de Saint-Venant ou de Boussinesq à deux dimensions d'espace horizontales. Ce logiciel calcule en tout point la hauteur d'eau et la vitesse moyennée sur la hauteur en prenant en compte la géométrie réelle de la retenue et les effets de réflexions possibles.

Comme la majorité des logiciels de modélisation hydraulique en 2 dimensions, TELEMAC ne permet pas d'intégrer un glissement de terrain en condition limite du logiciel. Ainsi, une méthode spécifique a été développée. Le principe général de la méthode est de créer un glissement « bathymétrique », c'est-à-dire une déformation verticale dynamique de la bathymétrie. Ainsi, l'énergie cinétique du glissement de terrain est globalement transformée en énergie potentielle pour l'eau.

Il est à noter que cette méthode engendre une mise en mouvement initiale d'un volume d'eau égal au volume du glissement et transforme une énergie cinétique en énergie potentielle, mais ne prend pas en compte les forces d'inertie et les forces visqueuses.

Deux vérifications doivent donc être réalisées de manière préliminaire pour pouvoir utiliser cette méthode pour un glissement donné : volume d'eau mis en mouvement par le glissement et forces dominantes à l'impact.

Pour le volume, le graphique de Fritz (Fig. 8) est utilisé. La méthode TELEMAC ne peut être mise en œuvre que si le glissement est « sans séparation » entre l'eau et le glissement (partie verte de la Fig. 8), c'est-à-dire avec un nombre de Froude relativement faible ( $F < 2$ ). Cette dernière condition est retrouvée dans la majorité des glissements de terrain dans une retenue.

Concernant les forces à l'impact, les forces d'inertie et les forces visqueuses deviennent dominantes dans les mécanismes de formation de vague lorsque le glissement de terrain est plus rapide que la vague formée. Cette condition est plus contraignante, le nombre de Froude ne doit pas dépasser 1 de manière significative. Ainsi, pour les glissements très rapides (~20 m/s) en retenue de profondeur moyenne (30 à 40 m), un coefficient de sécurité doit être évalué et pour les glissements les plus rapides (> 20 m/s) ou dans les retenues de faible profondeur, cette méthode n'est plus applicable.

Cette méthode peut sembler adaptée aux glissements monolithiques, toutefois lorsque cette méthode a été testée, notamment pour le lac Chehalis (glissement granulaire), les résultats calculés sont proches des résultats observés. Il est probable que le processus de génération de la vague avec cette méthode ne permet pas de transmettre toute l'énergie d'un impact de glissements monolithiques. Cette méthode doit donc être utilisée pour les glissements granulaires. Pour les glissements monolithiques, comme pour la méthode de Heller, la formule de Zweifel doit être appliquée.

## 5.2. APPLICATION DE CETTE METHODOLOGIE AU GLISSEMENT DE LA BERCHE

Les deux scénarios géologiques suivants, volontairement majorants, ont été considérés pour investiguer les risques de Sûreté et s'assurer qu'ils soient maîtrisés quelle que soit la situation effectivement rencontrée :

## C. 2

- (2-A) un glissement d'ensemble (pour un volume de l'ordre de 150 000 m<sup>3</sup> rentrant dans le lac) avec une vitesse d'entrée dans le plan d'eau qui resterait inférieure à 10 m/s ;
- (2-B) un éboulement en masse de la partie supérieure du glissement (pour environ 50 000 m<sup>3</sup> au maximum de manière simultanée), avec une vitesse maximale de 20 m/s.

### 5.2.1. Evaluation du risque par la méthode de Heller

Pour le lac du Chambon et à la demande des services de l'Etat, l'utilisation de cette méthode a permis d'évaluer avec une très grande réactivité le risque de vague aux points sensibles de la retenue en fonction des évolutions d'estimations de volume et vitesse du glissement tout au long de l'été 2015.

Les zones suivantes ont été étudiées : le barrage, la retenue (embarcations assurant la navette suite à la coupure de la route), la berge rive gauche du lac où une route « de secours » était en construction, un parking d'accès à un chemin de randonnée situé en rive droite en amont du glissement.

Une large gamme de volumes et vitesses de glissement, ainsi que de niveaux de retenue ont été étudiés avec cette méthode. Cette méthode a permis de démontrer l'absence de risque pour le barrage dans toutes les configurations envisagées. Cette méthode a aussi permis d'effectuer une remontée de cote pour aider à la déstabilisation du glissement en toute sécurité et de définir les portions de berge exposées au risque de submersion.

### 5.2.2. Evaluation du risque par les modélisations TELEMAC [13]

Les marges de sécurité prises avec la méthode de Heller étant importantes, un modèle a été réalisé pour la retenue et les berges du Chambon à l'aide d'une bathymétrie et d'un LIDAR récents pour les réduire.

Pour faciliter la programmation du glissement de terrain, une géométrie simple (Fig. 11) de ce dernier a été utilisée. Cette modélisation prend en compte une dispersion du glissement sous l'eau (Fig. 11). Ainsi, le glissement s'élargit et diminue en épaisseur en conservant son volume une fois dans la retenue pour simuler au mieux ce qui pourrait se produire dans la réalité.

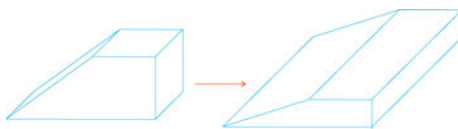


Fig. 11

Forme du glissement et évolution sous-marine du glissement  
*Landslide shape and underwater evolution*

Dans l'axe du glissement (zone A, Fig. 12), des caractéristiques de vague (hors coefficient de sécurité) ont été comparées pour les 2 méthodes pour les 2 scénarios géologiques avec des hypothèses équivalentes (forme, vitesse et volume –Tableau 1).

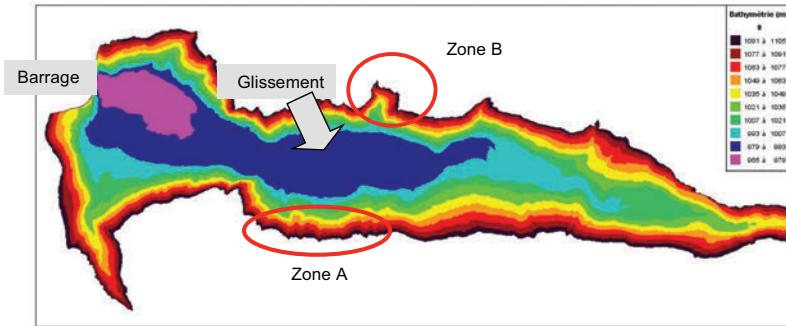


Fig. 12  
Topographie et bathymétrie du lac du Chambon  
*Topography and bathymetry of Chambon Lake*

Tableau 1  
Caractéristiques de la vague simulée sans coefficient de sécurité à dimensions du glissement équivalentes (\*)

Caractéristiques	2-A : 150 000 m <sup>3</sup> , 10 m/s		2-B : 50 000 m <sup>3</sup> , 20 m/s	
	Heller	TELEMAC	Heller	TELEMAC
Hauteur de vague [m]	~6	~6	~7	~8.5
Longueur d'onde [m]	440	320	480	150
Célérité [m/s]	22.3	19.6	22.7	23.4
Run-up maximal [m]	~12	~12	~16	~12

(\*) Simulated wave characteristics (same dimensions) without security coefficient

Cette comparaison met en évidence une bonne cohérence entre les 2 méthodes pour les hauteurs de vague et la célérité des ondes pour les 2 scénarios. On remarque toutefois que la vague formée par TELEMAC a une plus faible longueur d'onde et ainsi une plus faible énergie transportée. Ainsi, pour le scénario 2-B, les hauteurs de run-up, pour un nombre de Froude du glissement proche de 1, sont sous-évaluées. Un coefficient de sécurité a donc été appliqué aux résultats de TELEMAC pour ce scénario.

A proximité du glissement au fond d'une crique (zone B), la modélisation TELEMAC a mis en évidence une zone de fort run-up (environ 15 m). Ce run-up n'aurait pas pu être calculé avec la méthode Heller étant donné la forte influence de la géométrie de la retenue dans cette zone.

## C. 2

Au barrage, les hauteurs de la première vague sont proches (de l'ordre de 1 m, run-up de 1,5 m). Toutefois, TELEMAC met en évidence le risque qu'une vague secondaire soit plus élevée du fait de phénomène de réflexions multiples (hauteur maximale atteinte au cours de la simulation : ~2m).

Les modélisations TELEMAC et le fait d'avoir des résultats proches issus de 2 méthodes d'approches très différentes ont permis de gagner des marges de sécurité par rapport à l'utilisation de la seule méthode de Heller et a permis d'être en confiance pour remonter la cote de la retenue jusqu'à son niveau normal.

## 6. CONCLUSION

Les connaissances géologiques et les méthodes hydrauliques permettent aujourd'hui d'avoir une capacité d'évaluation rapide (Heller) ou plus complète (TELEMAC) du risque de vague induite par les glissements de terrain tenant compte de leurs caractéristiques géologiques, de manière graduée selon les marges de sécurité existantes. Les hauteurs de run-up obtenues doivent toutefois être considérées comme des ordres de grandeurs majorants étant donné les incertitudes inhérentes aux phénomènes naturels complexes mis en jeu par les glissements de terrain.

L'application de ces méthodes au glissement de la Berche a permis de gérer de manière rapide et transparente une « crise » géologique complexe.

## RÉFÉRENCES

- [1] DETREMBLEUR, S. Etude des hydrogrammes de surverse et de la ruine des barrages consécutives à des glissements de terrain dans la retenue. *Mémoire*. Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, 2002.
- [2] FRITZ, H. M. Initial phase of landslide generated impulse waves. *Dissertation 14871*, ETH Zürich, Zürich, 2002.
- [3] HELLER, V. Landslide generated impulse waves: Prediction of near field characteristics. *Dissertation 17531*, ETH Zürich, Zürich, 2008.
- [4] HELLER, V., HAGER, W. H., MINOR, H.-E. Landslide generated impulse waves in reservoirs: Basics and computation. *VAW-Mitteilung 211*, ed. ETH Zürich, Zürich, 2009.

- [5] HUBER, A., HAGER, W. H. Forecasting impulse waves in reservoirs. Proc. 19th Congrès des grands barrages, *Florence C.31:993-1005. ICOLD*, Paris, 1997.
- [6] KAMPHUIS, J. W., BOWERING, R. J. Impulse waves generated by landslides. *Proc. 12th Coastal Engineering Conference, Washington DC, 1:575-588. ASCE*, New York, 1972.
- [7] KOFOED-HANSEN H., CIFRES GIMENEZ E., KRONBORG P. Modelling of landslide generated waves in MIKE 21. *4th DHI Software Conference, Helsingør, Denmark, 2001, 21p.*
- [8] MÜLLER, D. Auflaufen und Überschwappen von Impulswellen an Talsperren. *VAW-Mitteilung 137*, Vischer, D., ed. ETH Zürich, Zürich, 1995.
- [9] PANIZZO, A., DE GIROLAMO, P., PETACCIA, A. Forecasting impulse waves generated by subaerial landslides. *Journal of geophysical research 110 C12025:1-23*, 2005.
- [10] ZWEIFEL, A. Impulswellen : Effekte der Rutschdicke und des Wassertiefe. *Dissertation 15596*, ETH Zürich, Zürich., 2004.
- [11] SELMI, J., FRUCHART, F. Etude sur modèle réduit du glissement de Léaz dans la retenue de Génissiat. *La Houille Blanche n°1-1990 p61-7*
- [12] HELLER, V., HAGER, W. A Universal Parameter to Predict Subaerial Landslide Tsunamis? *Journal of Marine Science and Engineering 2014, 2, 400-412; DOI: 10.3390*
- [13] VIARD, T. Hydraulic 2D Model of Landslide Generated Wave – Cases of Chelalis Lake and Chambon Lake, *XXIVth Telemac & Mascaret User Club, Graz, Austria, 17-20 October, 2017*