

LE GLISSEMENT DU CHAMBON : ÉVOLUTION DU PHÉNOMÈNE ET GESTION DE CRISE

THE CHAMBON LANDSLIDE : UNDERSTANDING OF THE PHENOMENON AND RISK MANAGEMENT

Laurent DUBOIS¹, Samuel DAUPHIN¹, Geneviève RUL¹

¹ Cerema Centre-Est, Bron, France

RÉSUMÉ - Le déclenchement d'un grand glissement de terrain a entraîné la fermeture totale à la circulation du grand tunnel du Chambon le 10 avril 2015 et, par conséquent, de la route RD1091, reliant Grenoble et Briançon par la vallée de la Romanche dans les Alpes françaises (département de l'Isère). La coupure de cet axe routier, unique en fond de vallée et sans déviation possible, pour une longue période, a eu et a toujours de lourdes conséquences sur la vie quotidienne des habitants et sur l'économie de la haute vallée de la Romanche. Au mois de juillet 2015, les mesures de sécurité supplémentaires adoptées lors de deux phases de grands déplacements du glissement de terrain, pendant lesquelles une rupture brutale était redoutée, ont rendu encore plus difficiles les communications entre les deux parties de la vallée, malgré le déploiement de mesures exceptionnelles pour rétablir la continuité des déplacements locaux. Le présent article fait le point sur la compréhension actuelle du phénomène et de son évolution temporelle, et présente notamment une interprétation des désordres géologiques comme les manifestations d'une rupture progressive du versant.

ABSTRACT - The triggering of a large landslide caused the complete closure of the Chambon tunnel and, therefore, of the major road RD1091 between Grenoble and Briançon by the Romanche valley in the French Alps (Isère department). This road was the only one in the valley and there was no possible short bypass. Its closure had and still has serious consequences on the inhabitants daily lives and the local economy. In July 2015, additional safety measures were adopted during two periods of large displacements of the landslide, during which catastrophic failure was feared, and made communications between the two parts of the valley even more difficult. This article contributes to the understanding of the phenomenon and its temporal evolution, and presents an interpretation of geological disorders as manifestations of a progressive failure of the slope.

1. Introduction

Un tronçon d'un linéaire d'environ 30 mètres du grand tunnel du Chambon (ouvrage d'une longueur de 780 mètres situé sur la route RD1091 reliant Grenoble et Briançon par la vallée de la Romanche dans le département de l'Isère et traversant une partie du versant nord de la retenue du barrage hydroélectrique du Chambon) connaissait depuis de très nombreuses années des désordres structurels notables. Le 10 avril 2015, le Conseil Départemental de l'Isère (CD38), maître d'ouvrage, a été contraint de fermer le tunnel à la circulation compte tenu de l'aggravation de ces désordres. En surface, à l'aplomb de la zone des désordres dans le tunnel, ont été observés le développement et la propagation dans le versant de fractures délimitant un volume en mouvement estimé entre 600 000 m³ (hypothèse raisonnable) et 800 000 m³ (hypothèse haute).

Les vitesses de déformation en profondeur et de déplacement en surface ont continué à régulièrement augmenter jusqu'à début juillet 2015 et ont contribué à l'abandon des travaux de réparation du tunnel lancés en urgence par le CD38 (réalisation d'une contre-voûte en béton). Au cours du mois de juillet 2015, le glissement de terrain, dont le pied est situé au fond de la retenue, a connu deux périodes de grands déplacements, pendant lesquelles une rupture brutale a été redoutée :

- la première du 4 au 6 juillet 2015 s'est produite alors que le niveau d'eau de la retenue était maintenu à un niveau constant depuis le 10 avril 2015,
- et la seconde du 25 au 27 juillet 2015 a été volontairement déclenchée par une élévation de 8,5 mètres du niveau d'eau de la retenue.

Les risques associés à une éventuelle rupture brutale (formation de vagues sur la retenue, phénomènes de run-up, nuage de poussières, etc.) ont nécessité une gestion de crise mobilisant de nombreux acteurs et l'adoption par le Préfet de l'Isère de mesures spécifiques pour assurer la sécurité des personnes et des ouvrages lors de ces deux « crises ».

Depuis fin juillet 2015, les déplacements en surface du glissement se poursuivent, en étroite relation avec les variations du niveau d'eau de la retenue et la pluviosité.

Le présent article expose, dans une première partie, une description du site complétée par celle du glissement, puis, dans une dernière partie, une interprétation de ces désordres comme les manifestations d'une rupture progressive du versant.

2. Description du site

Le glissement de terrain affecte un versant de la vallée de la Romanche dans le massif de l'Oisans, au niveau de la falaise de la Berche surplombant la retenue du barrage hydroélectrique du Chambon à Mizoën.

2.1 Contexte géomorphologique

Le glissement de terrain concerne la partie inférieure du versant nord de la vallée, qui présente une direction générale est-ouest, quasi-orthogonale à la direction des grandes structures géologiques du fait d'un processus d'antécédence. Entre les cotes NGF +985 (fond supposé de la retenue) et +1165 (escarpement principal du glissement marqué par une rupture de pente naturelle), le versant présente une pente moyenne de l'ordre de 40°. La vallée glaciaire de la Romanche présente un profil typique en auge : le glissement s'est développé au niveau du flanc légèrement plus raide de l'auge, immédiatement en deçà du niveau supposé du rebord d'auge (existence probable d'un épaulement glaciaire au dessus de la cote NGF +1170).

Le mouvement de versant est situé au pied d'un vaste cirque d'érosion, dominé par des sommets culminant à près de 2000 mètres d'altitude et marquant la bordure méridionale du plateau d'Emparis. Cette forme d'érosion est profondément incisée par quatre cours d'eau de direction parallèle (nord-nord-est – sud-sud-ouest). La partie occidentale du cirque, où se sont installés les hameaux de Singuigneret et des Aymes (à 200 mètres en amont de l'escarpement principal du glissement), présentant des pentes plus faibles, est soumise à des phénomènes érosifs moins intenses et est recouverte par la végétation.

La consultation d'anciennes cartes disponibles (notamment l'atlas des routes de France du milieu du XVIII^e siècle et la carte de l'état-major du milieu du XIX^e siècle) indique qu'avant la mise en eau du barrage, l'ancienne route passait en fond de vallée sur la rive gauche de la Romanche et que le site de l'actuel glissement occupait une partie de la rive concave d'un coude de la rivière (cf. figure 1).

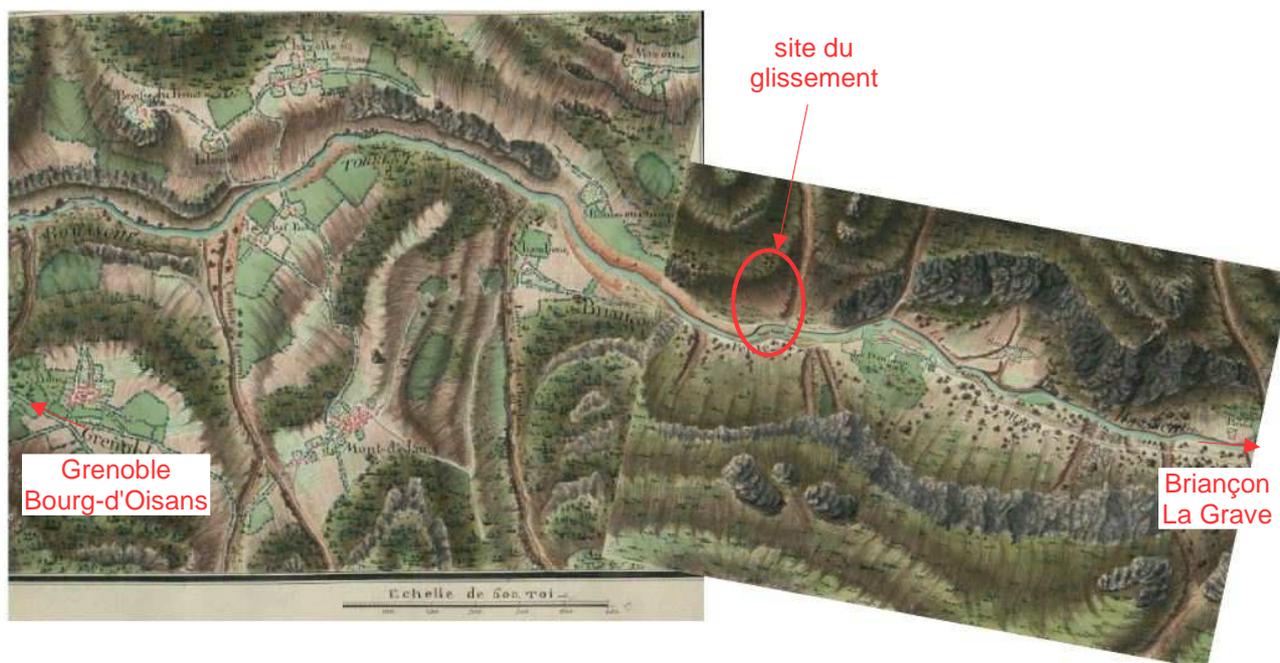


Figure 1. Extrait de l'atlas des routes de France concernant la petite route de l'Oisans reliant Grenoble à Briançon, établi vers 1750 (source : www.culture.gouv.fr).

Le pied du versant baigne en permanence dans la retenue du barrage hydroélectrique du Chambon, dont le niveau varie entre les cotes NGF +990 (cote minimale d'exploitation) et +1040 (cote maximale historique d'exploitation). La dernière vidange totale a été réalisée en 1993. Le barrage du Chambon a subi en 2013 et 2014 des travaux lourds de confortement, concentrés en partie supérieure de l'ouvrage entre la cote NGF +1010 et le sommet à la cote NGF +1042. Le niveau d'eau de la retenue a été maintenu à une cote inférieure à NGF +1010 pendant toute cette période. Le 10 avril 2015, au moment de la décision de fermeture du tunnel, la procédure de requalification du barrage allait débuter. Le niveau d'eau se situait à la cote NGF +1006, soit 36 mètres en deçà de la crête du barrage, et a été maintenu à cette cote jusqu'à début juillet 2015 par décision préfectorale, afin de ne pas interagir avec le phénomène de glissement en cours.

2.2 Contexte géologique

Le versant instable est constitué de schistes relativement homogènes (marnes métamorphisées) d'âge Aalénien, faisant partie du flanc oriental du synclinal du Praouat de direction nord-nord-est - sud-sud-ouest. Le coeur du synclinal du Praouat, constitué par les marno-calcaires du Bajocien, plus résistants à l'érosion et armant la falaise de la Berche, est situé à l'ouest du glissement. À l'est, au niveau de la tête du grand tunnel du Chambon côté La Grave, les schistes sont en contact avec le Toarcien schisteux, de couleur plus sombre.

Le synclinal du Praouat fait partie de la série de plis affectant la couverture jurassique du bloc cristallin d'Emparis au niveau de l'hémigraben du Ferrand (cf. figure 2.a). Le contact entre le bloc cristallin des Grandes Rousses et celui d'Emparis se fait par l'intermédiaire d'un accident tectonique majeur, appelé faille du Chambon, situé à l'ouest du secteur.

Au niveau de la partie inférieure du versant, les anciens terrains sédimentaires ont été intensément plissés et déformés. En surface, les schistes présentent un débit feuilleté, sont très altérés et peu résistants (cf. figure 2.b)). On note une constance de l'orientation de la schistosité ($S1 : N10^{\circ}E \text{ à } N35^{\circ}E - 50^{\circ}SE \text{ à } 70^{\circ}SE$), rentrante dans le massif, de même direction et quasi-orthogonale à la stratification qui a été quasi totalement effacée ($S0 : N0^{\circ}E \text{ à } N10^{\circ}E - 45^{\circ}NW \text{ à } 55^{\circ}NW$). En profondeur, les schistes sont plus sains et compacts. La majeure partie du linéaire du tunnel est d'ailleurs non revêtue.

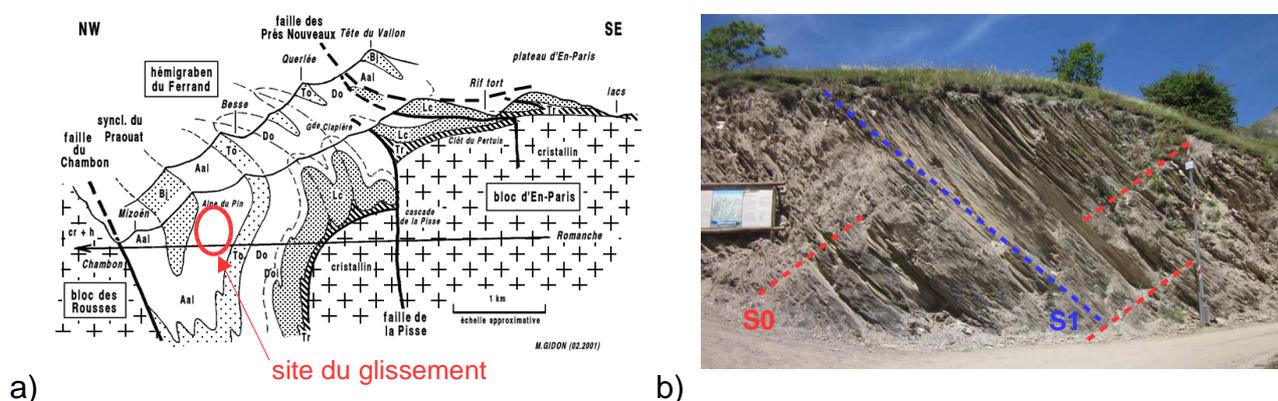


Figure 2. a) Coupe géologique le long de la vallée de la Romanche (Gidon 2001).
b) Affleurement de schistes altérés à proximité du glissement.

2.3 Contexte sismique

Une dizaine de séismes ont été enregistrés dans le secteur de La Grave entre juillet 2014 et juin 2015, tous de magnitude locale ML relativement faible, comprise entre 1,1 et 2,8 (source : Sismalp). Le dernier séisme notable dans la région (ML = 4,8) remonte au 7 avril 2014 ; son épicentre était situé près de Jausiers (04), à environ 80 km au sud-est de la retenue du Chambon. Le glissement de terrain a montré une légère sensibilité aux vibrations engendrées par des tirs de mines réalisés à proximité.

2.4 Contexte météorologique

D'après les relevés de la station météorologique de EDF de La Grave, les mois précédant l'aggravation des désordres dans le tunnel début 2015 ont été caractérisés par une pluviosité inférieure à la normale (cf. figure 3.a)). Une fonte de la neige due à un radoucissement soudain des températures a été observée sur les sommets fin mars 2015. La première « crise » de juillet 2015 a été précédée par une période sèche d'une durée de 17 jours, la seconde « crise » de juillet 2015 par quelques épisodes pluvio-orageux d'intensité faible à moyenne (cf. figure 3.b)).

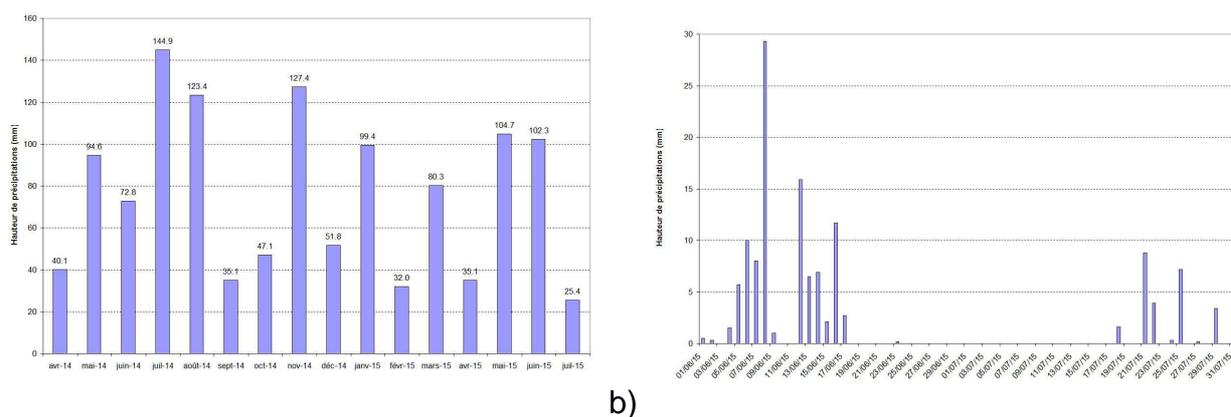


Figure 3. a) Précipitations mensuelles à La Grave entre avril 2014 et juillet 2015. b) Précipitations journalières à La Grave en juin et juillet 2015 (source : EDF).

2.5 Contexte hydrogéologique

En pied de versant, il existe très probablement dans les schistes relativement perméables une nappe d'accompagnement en équilibre avec le niveau d'eau de la retenue. De plus, les fissures du massif rocheux sont les sièges de circulations d'eau préférentielles, dont une partie est interceptée par le tunnel. Ces venues d'eau, ainsi que l'eau de la source des Aymes, la plus proche du glissement de terrain en surface, sont basiques (pH entre 7,5 et 8,3). Elles présentent une minéralisation élevée (conductivité supérieure à 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$), voire, pour certains points de mesures, une minéralisation très élevée (conductivité entre 1000 et 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$) (cf. figure 4). Ces hautes valeurs de conductivité pourraient révéler de longs trajets ou de longs temps de séjour de l'eau dans les fissures des formations carbonatées de la couverture jurassique.

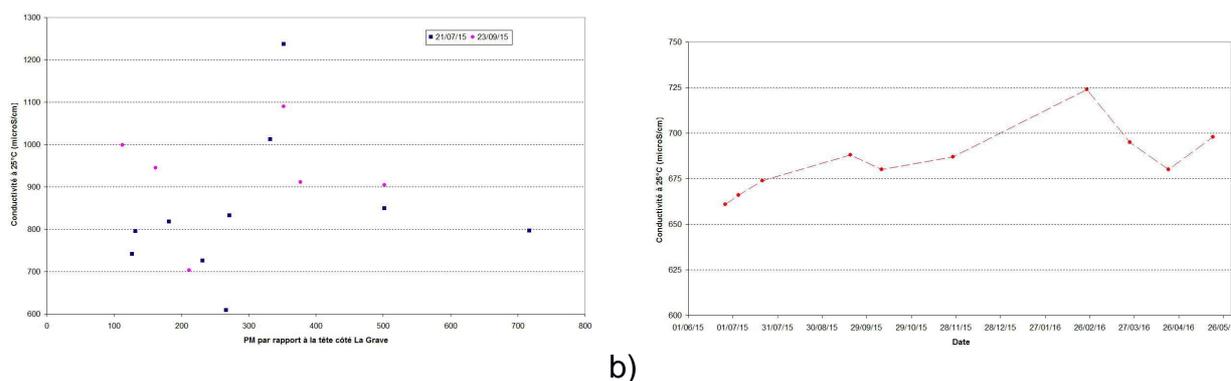


Figure 4.a) Conductivité des venues d'eau dans le tunnel (repérées par leurs points métriques notés PM). b) Conductivité de l'eau de la source des Aymes.

2.6 Historique des désordres affectant le grand tunnel du Chambon

Le percement du grand tunnel du Chambon (visant à rétablir la route nationale RN91 déplacée par la construction du barrage) a débuté en 1931 et a été achevé au début de l'année 1933, avant le premier remplissage de la retenue entre avril 1935 et octobre 1935. Le tunnel a été creusé à l'explosif en sections divisées et selon deux attaques, avec galerie d'abattage en clef (1931), puis élargissement à la section définitive (1932).

Les travaux côté La Grave ont été rendus délicats par la découverte en novembre 1931 d'une fracture longue de 130 m et large de 0,5 m (entre les PM40 et PM160), remplie de matériaux « plus terreux et instables », de même direction que la galerie d'avancement. Au cours de l'année 1932, la mise à la section définitive dans cette même zone a également été problématique (importants travaux de purge, éboulement d'un volume de 200 m³ de la voûte, comblement des zones purgées ou ébouloées avec du béton maigre).

Par la suite, le secteur situé entre les PM60 à PM90, très humide, n'a cessé de subir des désordres (chutes d'écaillés détachées du toit, fissuration de la voûte, etc.) (cf. figure 5) et a fait l'objet de travaux lourds de réparation, notamment à la fin des années 1970 (renforcement de la voûte maçonnée originelle par une voûte en béton armé, clouage de blocs de béton instables, etc.). Un profil de mesures extensométriques a été mis en place au PM69 en juillet 1979 et ausculté jusqu'en avril 2015 (cf. figure 6).

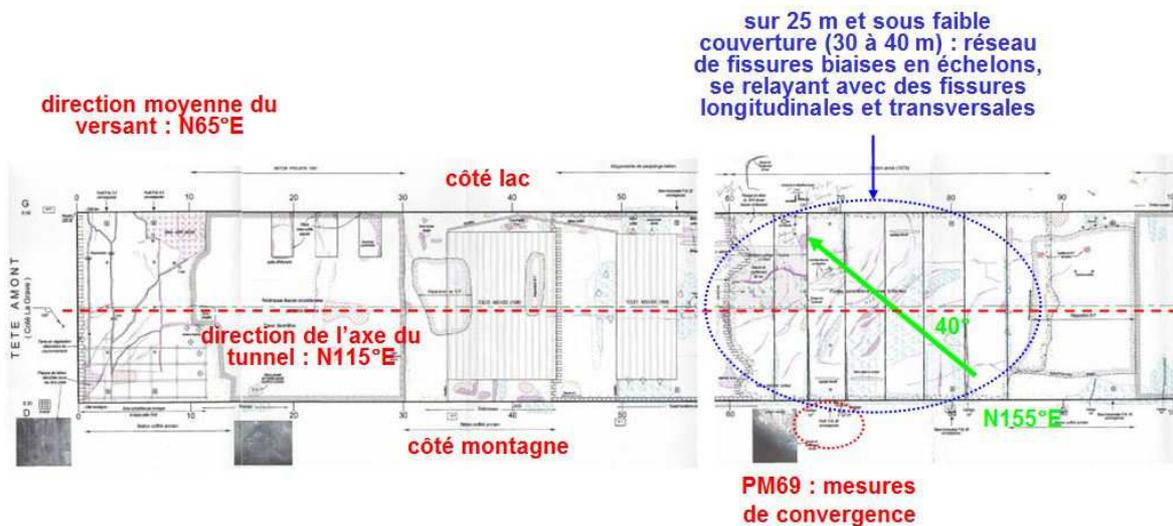


Figure 5. Relevé des désordres affectant le grand tunnel du Chambon lors de l'inspection détaillée de 2005 avant transfert au CD38 (source : DDE38/CETU).

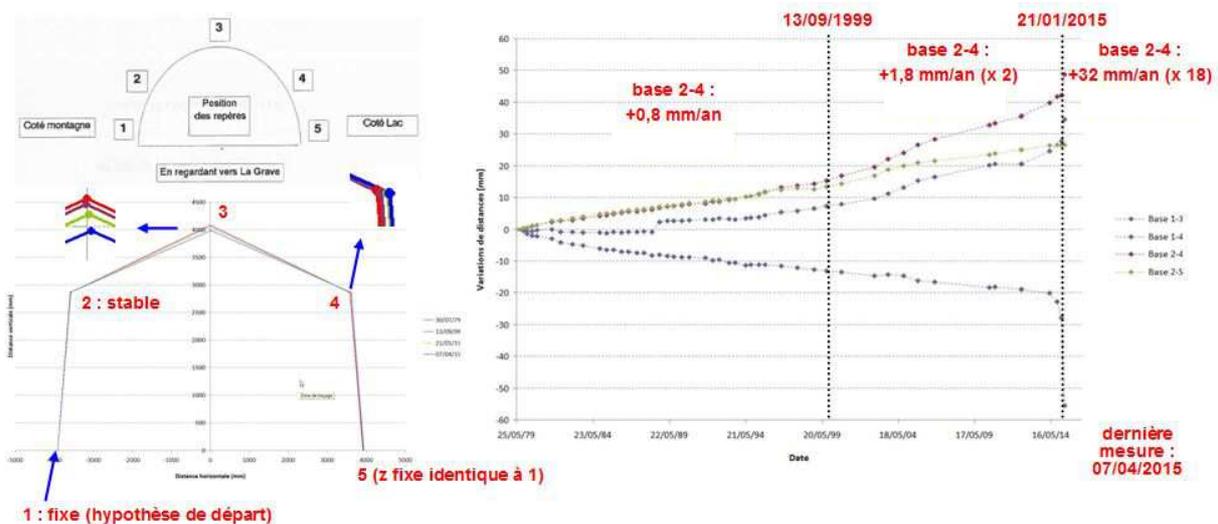


Figure 6. Mesures extensométriques réalisées au niveau du profil du PM69 entre juillet 1979 et avril 2015 (source : DDE38/CD38).

Des déformations, d'amplitude relativement faible mais de vitesse croissante par paliers, étaient mesurées depuis 1979, avec une composante transversale légèrement déjetée vers l'aval et une tendance à l'aplanissement de la voûte. On note une première augmentation de la vitesse des déformations à la fin de l'année 1999, puis une seconde plus brutale à partir de la fin de l'année 2014. Début avril 2015, les désordres évolutifs (notamment la fissuration et le décollement d'un bloc de plusieurs m³ de la voûte en béton) ont conduit le CD38 à fermer préventivement le tunnel à la circulation.

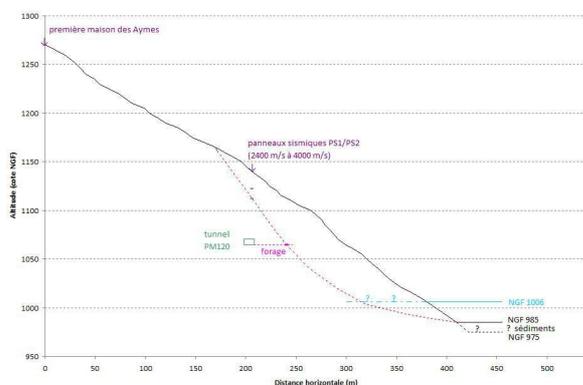
3. Description du glissement de terrain

3.1 Mécanisme

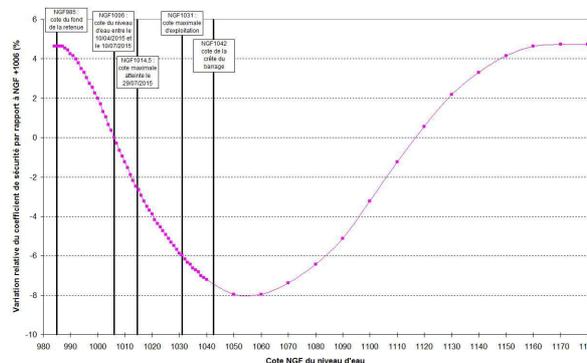
Le CD38 a observé dès le 12 avril 2015 des fractures en surface dans le versant à l'aplomb de la zone des désordres dans le tunnel (futur escarpement principal). Les observations de terrain réalisées par les géologues du CD38, du bureau d'études SAGE et de EDF ont mis en évidence une propagation des fractures latérales du glissement du haut vers le bas à une vitesse moyenne de l'ordre de 3 m/j (soit 10 à 15 cm/h), jusqu'à atteindre la cote NGF +1006 (niveau d'eau de la retenue) le 26 mai 2015. Par ailleurs, les vitesses des déplacements en surface, suivis par géodésie par le CD38 depuis fin mai 2015, ont augmenté de manière continue jusqu'à début juillet 2015.

Les observations de terrain et l'analyse des résultats des reconnaissances engagées par le CD38 (relevés LiDAR, reconnaissances géophysiques, sondages destructifs et mesures des déplacements) révèlent un glissement de terrain bien délimité, avec une surface en forme de cuillère, un escarpement principal en vaste arc de cercle et des déplacements présentant une double composante translationnelle et rotationnelle (cf. figures 7.a) et 8). Le glissement a un dénivelé d'environ 180 mètres et une largeur d'environ 100 mètres. L'épaisseur maximale des terrains en mouvement est de l'ordre de 25 à 30 mètres. Le bourrelet de pied est situé au fond de la retenue sous le niveau d'eau (cf. figure 9).

Le contrôle structural du glissement de terrain n'est pas évident, même si le flanc ouest semble être conforme à la schistosité. Au cours des mois de juin et de juillet 2015, la masse en mouvement s'est fracturée en trois grands compartiments, présentant chacun sa propre cinématique, le plus volumineux et le plus actif étant le compartiment basal n°1.



a)



b)

Figure 7.a) Coupe transversale schématique du versant instable.

b) Variation du coefficient de sécurité en fonction du niveau d'eau dans la retenue.

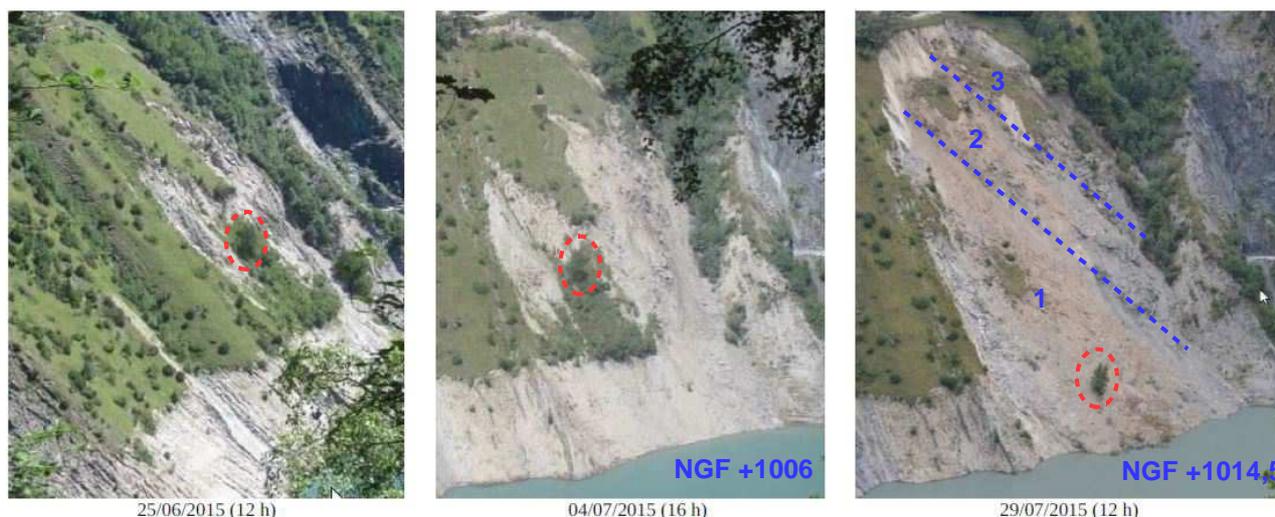


Figure 8. Différents stades d'évolution du glissement de terrain fin juin 2015 à gauche, début juillet 2015 au centre et fin juillet 2015 à droite (avec compartiments numérotés, arbre repère sur le glissement et cote NGF du niveau d'eau).



Figure 9. Bourrelet de pied dans la retenue le 24 mars 2016.

La variation relative du coefficient de sécurité calculé pour la surface de la figure 7.a) ci-avant, en fonction de la variation du niveau d'eau de la retenue et par rapport à la situation de référence avec un niveau d'eau à la cote NGF +1006, est illustrée par la figure 7.b). Les calculs ont été réalisés par la méthode de Carter au moyen du logiciel Geostab, en considérant une nappe dans le versant en équilibre avec le niveau de la retenue. À géométrie du versant constante, une montée du niveau de l'eau au dessus de cette cote de référence entraîne une diminution du coefficient de sécurité (environ -6 % à la cote maximale d'exploitation), alors qu'une baisse du niveau d'eau entraîne une augmentation du coefficient de sécurité (environ +5 % en cas de vidange totale).

3.2 Première « crise » de juillet 2015

Les vitesses maximales de déplacement atteintes en pied ont été de l'ordre de 50 à 65 cm/j et les déplacements totaux en tête ont été de l'ordre de 4 à 5 mètres.

La figure 10.a) représente l'allure des courbes ($1/Vm_{24}$) en fonction du temps obtenues pour des cibles topographiques représentatives en surface du glissement, auscultées toutes les heures par le CD38. Vm_{24} désigne la vitesse moyenne sur 24 heures.

Quatre phases peuvent être distinguées :

- une tendance globalement linéaire et convergente jusqu'à la nuit du 4 au 5 juillet 2015,
- le maintien de vitesses élevées sans accélération notable pendant environ 24 heures,
- une accélération brutale, limitée dans le temps (environ quatre heures) et selon une tendance asymptotique, dans la nuit du 5 au 6 juillet 2015,
- puis un nouveau palier de vitesses constantes d'environ 24 heures, suivi d'une diminution des vitesses.

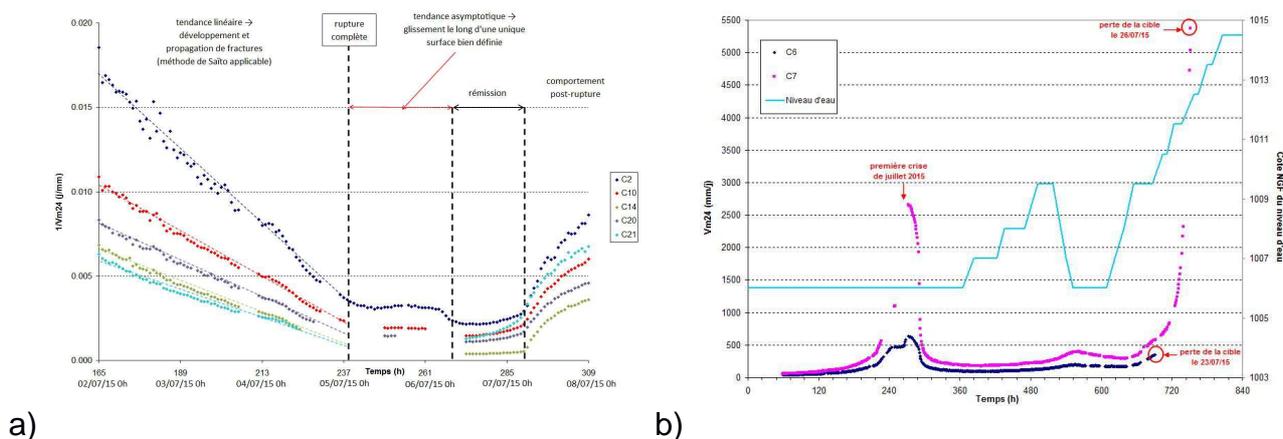


Figure 10.a) Évolution des courbes ($1/Vm_{24}$) début juillet 2015.

b) Évolution des vitesses Vm_{24} pour des cibles en pied de glissement en juin et juillet 2015 (source des données brutes : CD38).

Quelques jours avant cette première « crise », une rupture brutale étant redoutée, EDF avait réalisé des calculs de hauteur de vagues basés sur des hypothèses conservatives (méthode empirique de Heller, volume glissé d'un million de m^3 , vitesses d'entrée dans l'eau égales à 10 m/s et à 30 m/s). Les résultats de ces calculs étaient les suivants :

- hauteur maximale des vagues sur le lac : 18 à 40 m,
- hauteur du phénomène de run-up sur le versant opposé : 50 à 140 m,
- hauteur maximale des vagues au niveau du barrage : 2 à 4 m (sans incidence sur la structure de l'ouvrage).

Compte tenu de la tendance d'évolution du glissement et des résultats des calculs de hauteur de vagues, le Préfet de l'Isère a décidé la mise en œuvre des mesures de sécurité suivantes : suspension des navettes lacustres (en fonctionnement dès le 27 avril 2015 et remplacées par des navettes héliportées), interdiction d'accès aux berges de la retenue et aux sentiers de randonnée sur les versants sud et nord, et confinement des habitants des hameaux des Aymes et de Singuigneret quelques heures avant une éventuelle rupture brutale. Ces mesures ont été maintenues jusqu'à mi-août 2015.

La rupture brutale n'étant pas intervenue, il a été décidé dans les jours suivants :

- d'examiner la faisabilité technique d'une purge au moins partielle du glissement par terrassement et minage. Cette solution présente de nombreuses incertitudes,
- et d'évaluer la sensibilité du glissement aux variations du niveau d'eau de la retenue.

Un protocole de montée par paliers suivie d'une descente brutale du niveau d'eau a ainsi été mis en œuvre sur quelques jours par EDF. Les résultats sont présentés sur le graphique de la figure 10.b) et sont concordants avec les calculs présentés à la figure 7.b) ci-avant : une élévation de 3,5 m du niveau d'eau a conduit à une augmentation des vitesses (après un délai de réaction du massif d'environ 24 heures), une diminution du niveau d'eau à une vitesse de 1 m/j (vitesse maximale possible) a conduit à une diminution des vitesses et ne permet pas d'atteindre des conditions de vidange rapide.

3.3 Seconde « crise » de juillet 2015

Compte tenu des résultats du protocole exposés ci-avant et dans le but d'accélérer le glissement, le Préfet de l'Isère a décidé d'élever le niveau d'eau de la retenue à partir du 20 juillet 2015 pour atteindre la plus haute cote possible (NGF +1014,5), en débutant en parallèle la procédure de requalification du barrage.

Dans la nuit du 26 au 27 juillet 2015, les vitesses de déplacement ont dépassé 750 cm/j, avec une tendance nette à l'accélération (cf. figure 11, la dernière cible disponible, C10, a été perdue en milieu de nuit). La rupture brutale n'est cependant pas intervenue, les déplacements totaux du compartiment 1 ont été estimés de l'ordre de 15 à 20 mètres.

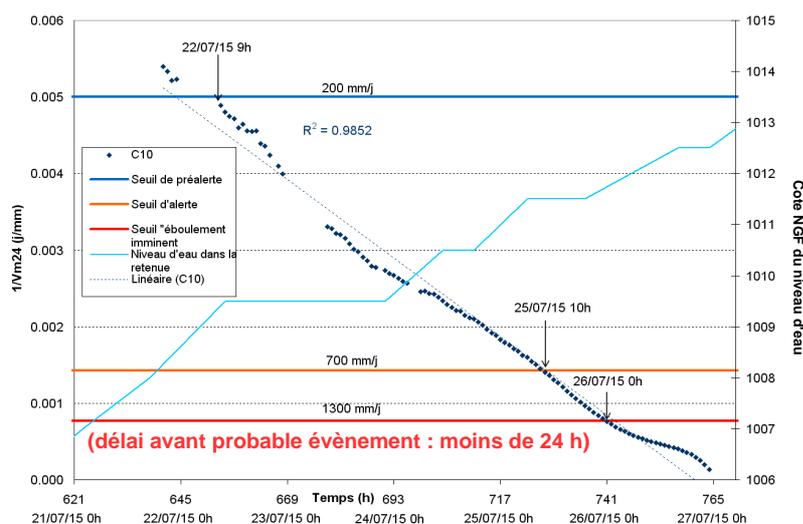


Figure 11. Évolution de la courbe (1/Vm24) de la cible C10 fin juillet 2015.

Comme pour la première « crise » de juillet 2015, le ralentissement des vitesses résulte très certainement de la modification de la géométrie du glissement induite par les grands déplacements. Le volume total de matériaux glissés et/ou éboulés au fond de la retenue au cours du mois de juillet 2015 a été estimé de l'ordre de 100 000 m³ à partir de relevés LiDAR, ce qui représente environ un sixième du volume total initial du glissement.

4. Interprétation

Le déclenchement du glissement s'est produit 80 ans après le premier remplissage du barrage. Il existe de nombreux cas historiques de réactivation d'anciens mouvements de terrain au cours ou dans les mois suivant le premier remplissage d'un barrage : Grand Coulee aux USA, Pontesei (1959) et Vajont (1963) en Italie, Grand'Maison (1986) et Puylaurent (1996) en France (Thomaïdis et al. 2001), Trois-Gorges en Chine, etc.

Le contexte du site, les observations et mesures, le comportement du glissement de terrain nous conduisent à proposer la succession de phases décrites ci-après.

4.1 Phase de pré-rupture jusqu'à début avril 2015

Les désordres affectant le tunnel, similaires à certains analysés par Causse (2015), étaient compatibles avec l'existence d'un mouvement de versant, très lent, selon une direction principale oblique par rapport à la direction de l'ouvrage. Cette direction principale correspond approximativement à celle de la ligne de plus grande pente du versant (cf. figure 5). Ce dernier se trouvait très certainement dans un état proche de l'équilibre avant le début du percement du tunnel en 1931 (forte pente, érosion en pied par la Romanche, contraintes de cisaillement élevées mais inférieures à la résistance au cisaillement instantanée de pic de la matrice des schistes) et était affecté par des déformations très lentes de fluage sous cisaillement selon des mécanismes analogues à ceux décrits par Vyalov et Maksimyak (1976) : réarrangement de la structure et développement progressif de défauts (microfissuration et coalescence des fissures).

En effet, les schistes du massif, du fait de leurs principales caractéristiques physiques et mécaniques (marnes métamorphisées, fortement anisotropes, très altérables et peu résistantes), peuvent être rattachés à la famille des Sols Indurés Roches Tendres (SIRT), présentant un comportement mécanique intermédiaire entre sols et roches. Ces schistes sont doués de fluage.

Ter-Stepanian (1996) a montré que l'intensité des déformations de fluage dépendait, en particulier, du rapport de contraintes q/p' , où q la contrainte déviatorique et p' désigne la contrainte effective moyenne régnant dans le versant. La présence d'eau dans le massif, en lien avec la retenue du barrage, a pu modifier l'état initial des contraintes (diminution de p' en pied de versant avec q constant), ce qui a pu créer les conditions d'une augmentation de la vitesse des déformations de fluage. Au cours de cette phase de pré-rupture (« fluage profond »), les déformations se sont produites dans de larges zones du massif. Du fait du phénomène de concentration du fluage avec le temps, ces zones ont eu tendance à s'amincir graduellement jusqu'à former des bandes étroites et devenir le siège d'un fluage non amorti (« accéléré » ou « désordonné »). Le processus a conduit à une rupture totale en cisaillement selon une unique surface située au voisinage de la voûte du tunnel dans la zone des désordres historiques.

4.2 Phase de rupture entre début avril 2015 et début juillet 2015

Les observations de terrain nous permettent de formuler l'hypothèse du développement de la surface de glissement à travers le massif encore peu remanié selon un mécanisme de rupture progressive, du haut vers le bas, favorisé par certaines conditions (champ de contraintes non homogène, comportement supposé dilatant radoucissant de la matrice des schistes, faible confinement, hautes contraintes de cisaillement).

Peu d'observations sont disponibles quant à la progression en profondeur des surfaces de glissement dans le cadre de phénomènes de type "first time failure". Petley (2004) a par exemple réinterprété la rupture d'un talus d'une hauteur d'environ 20 mètres dans les Argiles du Gault à Selborne en Grande-Bretagne en 1989. La rupture progressive a été déclenchée artificiellement par une élévation lente et contrôlée des pressions d'eau dans le massif pendant une période de 180 jours.

L'allure des courbes ($1/V$) en fonction du temps obtenues à Selborne est similaire à celle présentée sur le graphique de la figure 10.a) et peut donc renseigner sur le mode de rupture du massif :

- une tendance linéaire traduirait l'initiation et la propagation de fractures,
- et une tendance asymptotique un glissement le long d'une unique surface bien définie.

4.3 Phase de post-rupture après début juillet 2015

La phase de post-rupture à partir du 6 juillet 2015 jusqu'à aujourd'hui est caractérisée par l'existence de phases de réactivation du glissement de terrain en relation avec des épisodes d'élévation du niveau de la retenue (requalification en deux étapes : au cours de la seconde quinzaine de juillet 2015 et lors du mois de mai 2016) ou des périodes d'augmentation des circulations d'eau naturelles dans le massif en lien direct avec la pluviosité (hiver 2015). Les déplacements totaux du compartiment 1 depuis le 1^{er} août 2015 ont ainsi atteint au moins 2 à 3 mètres.

5. Conclusions

Le déclenchement du glissement du Chambon en 2015, selon un mécanisme de rupture progressive, fait suite à une longue phase de pré-rupture, s'étalant sur plusieurs dizaines d'années au minimum et mettant en jeu le comportement mécanique particulier des schistes armant le versant.

Le cas du glissement du Chambon illustre les difficultés parfois rencontrées pour identifier et interpréter les phénomènes en jeu (fluage, influence de la viscosité, etc.), prévoir leur évolution et anticiper la survenue d'évènements brutaux susceptibles d'impacter certains axes de communication sensibles. Au cours de la gestion des « crises », l'analyse en quasi temps réel des mesures disponibles a cependant apporté des renseignements précis sur le stade d'évolution du glissement aux géologues mobilisés (CD38, SAGE, EDF, RTM38 et Cerema). Elle a permis de réactualiser régulièrement la connaissance du phénomène, et ainsi de rendre l'appui technique au Préfet le plus pertinent possible.

6. Références bibliographiques

- Causse L. (2015). Analyse et modélisation des interactions géomécaniques entre tunnels et versants instables. *Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.*
- Gidon M. (2001). Les massifs cristallins externes des Alpes occidentales françaises sont-ils charriés ?. *Géologie alpine, n°77, 23-38.*
- Petley D.N. (2004). The evolution of slope failures : mechanisms of rupture propagation. *European Geosciences Union, Natural Hazards and Earth System Sciences, Volume 4, 147-152.*
- Ter-Stepanian G. (1996). Concentration du fluage avec le temps. *Revue Française de Géotechnique, n°74, 31-43.*
- Thomaïdis C., Devèze G., Dubie J.Y. (2001). Mouvements de versants des retenues hydroélectriques - Retour d'expérience et gestion du risque. *Revue Française de Géotechnique, n°95-96, 165-176.*
- Vyalov S.S. Maksimyak R.V. (1976). Étude du mécanisme de déformation et de rupture des sols argileux. *Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, n°86, 61-74.*