## Le glissement du Billan (retenue du barrage de Grand'Maison, Isère) : description et analyse de l'évolution du phénomène et des techniques topographiques d'auscultation employées au cours du temps

Billan Landslide (Reservoir of Grand'Maison dam, Isère, French Alps) Description and analysis of the evolution of phenomenon and topographic monitoring techniques used over the year

#### Patrice SCHARFF

EDF-CIH, Savoie Technolac, 73373 LE BOURGET DU LAC Téléphone : +33 4 79 60 62 02, Fax : +33 4 79 60 62 31, <u>patrice.scharff@edf.fr</u>

#### **Philippe REBUT**

EDF-DTG, rue Saint-Sidoine, 69003 LYON Téléphone : +33 4 69 65 53 62, Fax : +33 4 72 33 55 49, <u>philippe-1.rebut@edf.fr</u>

## **MOTS CLÉS**

Auscultation, stabilité, fauchage, nivellement, géodésie, photogrammétrie, GPS, INSAR

## RÉSUMÉ

Sur le versant rive droite de la retenue hydro-électrique de Grand'Maison (Isère, Alpes), le glissement du Billan s'est activé (ou réactivé) en mai 1986. Des actions immédiates ont été engagées avec succès par Electricité de France pour stabiliser rapidement le massif (baisse du plan d'eau, drainage) et surveiller l'évolution du phénomène. Celui-ci résulte à la fois de l'essorage du massif après la montée de la piézométrie pendant la fonte des neiges et de mouvements plus complexes dus au fauchage généralisé du versant (55m d'épaisseur affectés dans la zone du glissement). Un dispositif d'auscultation par nivellement, qui avait été mis en place quelques années auparavant pour contrôler la stabilité de la nouvelle route du col du Glandon (CD526) pendant les travaux, a permis d'être très réactif lors de la crise et de disposer immédiatement d'éléments de comparaison. Aujourd'hui, un retour d'expérience de 30 ans est établi sur l'ensemble des dispositifs et techniques topographiques qui se sont succédés pour l'auscultation du versant (nivellement, géodésie, photogrammétrie, GPS) en montrant la bonne adéquation réalisée entre la cinétique du glissement, la précision exigée pour les mesures et les contraintes spécifiques au milieu de montagne. Ces méthodes disposent aujourd'hui de matériel plus performant (niveau numérique avec mire invar à code barre, voyants multidirectionnels, théodolites motorisés,...). La technique d'Interférométrie Radar (INSAR), actuellement en cours de qualification à EDF, mérite d'être évaluée pour ce site en montagne et sa problématique.

#### ABSTRACT

On the right bank slope of Grand'Maison (Isère, French Alps) hydro reservoir, the sliding of the Billan was activated (or reactivated) in May 1986. Immediate action was successfully taken by Electricité de France to rapidly stabilise the massif (lowering of the water, drainage) and monitor the development of the phenomenon. It is the result of both the draining of the massif after the piezometric increase during the thaw and more complex movements due to the general topling of the slope (55m depth affected in the slide zone). A levelling monitoring device, which had been set up a few years earlier to control the stability of the new departmental road (CD526) during the works, resulted in the capacity to react very rapidly when the crisis occurred and to have comparative elements immediately. Today, there is 30 years' feedback on all of the topographical devices and techniques that have been used to monitor the massif (levelling, geodesy, photogrammetry, GPS) showing the good combination carried out between the kinetics of the slide, the precision required for the measurements and the specific constraints in mountain surroundings. These methods now have more efficient equipment (digital level, invar staff with bar code, multidirectional prisms, motorized theodolites, etc.). The interferometric synthetic aperture radar technique (INSAR), currently undergoing qualification at EDF, deserves to be assessed for this mountain site with its specific problems.

#### 1. INTRODUCTION

Situé à 30 km à l'Est de Grenoble, l'aménagement hydroélectrique de Grand'Maison est une station de transfert d'énergie par pompage de 1800 MW, dont la construction s'est achevée en 1985 [1]. Il comprend une retenue supérieure sur le torrent de l'Eau d'Olle, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- barrage en terre et enrochements de 160 m de hauteur et de 550 m de longueur en crête à la cote 1700 NGF, situé à 6 km au sud-ouest du col du Glandon;
- réservoir de 137 hm3 à la cote de Retenue Normale (RN) 1695m NGF ; longueur 8400 m ; largeur 600 m ;

Le glissement du Billan se situe en rive droite de la retenue à 2 km à l'amont du barrage de Grand'Maison (Fig. 1**Figure**). La première mise en eau complète du réservoir s'est achevée en 1987, décalée d'un an par l'activation du glissement de terrain (Fig. 2).



Figure 1 : localisation de la retenue de Grand'Maison et du glissement du Billan



*Figure 2* : cote de retenue depuis la 1<sup>ère</sup> mise en eau [10]

#### 2. CADRE GEOLOGIQUE

Le versant rive droite de la retenue est constitué en partie supérieure de terrains cristallins (Massif de Belledonne) et en partie inférieure par des schistes marno-calcaires jurassiques du lias. Le contact entre ces deux formations se fait par une faille (Figure). Ces deux types de terrains sont fortement marqués par une schistosité dont l'orientation est N 30°E 70°E. Le contact lias/cristallin est conforme à cette schistosité. Dans les deux tiers amont des berges de la rive droite de la retenue, des phénomènes importants de fauchage

(Fig. 4) se sont développés du fait d'une schistosité importante, très redressée, sensiblement parallèle à la direction générale du versant qui a une forte pente [2].





Figure 3 : Profil géologique Rive Droite (EDF-TEGG)

Figure 4 : Affaissements liés au fauchage (site du Billan, zone de cristallin)

Ces phénomènes affectent les terrains sur de fortes épaisseurs (jusqu'à environ 100 m) et sur l'ensemble du versant depuis son pied à l'altitude 1610 jusqu'à la cote 2100 environ, cote à laquelle apparaissent les premiers polis glaciaires décomprimés mais non fauchés.

Dans la zone du glissement proprement dit, entre les cotes 1880 et 1720, l'épaisseur des terrains fauchés est de 55m, perpendiculairement à la pente.

Les vitesses moyennes de ces phénomènes lents de fauchage sont de l'ordre de quelques mm/an [3].

## 3. CADRE CLIMATIQUE

Les apports annuels hydriques sont de 2500 mm environ dont 1800 mm (70%) sous forme de neige. Pendant la période hivernale (6 mois), l'accès au site est rendu impossible en raison des avalanches. La fonte se produit entre le 15 avril et le 15 juin et de manière brutale.

L'enneigement et la fonte de neige au printemps ont eu un rôle important dans l'instabilité du versant Rive Droite.

## 4. FACTEURS AGGRAVANTS ANTHROPIQUES

L'intervention de facteurs aggravants peut être prépondérante dans l'amorçage de mouvements de terrain, même dans des zones réputées stables.

#### 4.1 Aménagement routier

La route d'accès au col du Glandon (CD526) qui serpentait en fond de vallée avant les travaux, a été détournée pour emprunter un nouveau tracé en flanc de versant rive droite, au dessus de la retenue.

Les travaux concernant ce rétablissement ont été terminés en 1979.

Cette route, réalisée en déblai, a la particularité d'être assise sur la partie fauchée du versant et d'intersecter la faille (Fig. 3**Figure**).

#### 4.2 Extraction de matériaux en pied de versant

Les matériaux constitutifs du barrage ont été prélevés sur 3 gites situés dans la retenue dont le gite Eau d'Olle rive droite (sous la zone du glissement), constitué d'éboulis de pente et de dépôts morainiques utilisés pour la recharge aval de la digue. Les matériaux ont été extraits jusqu'au rocher, indiqué en rouge ci-dessous (Fig.5).



Figure 5 : situation avant travaux au profil central 506 du gîte d'extraction rive droite

#### 5. ESTIMATION DE LA STABILITE DU VERSANT AVANT TRAVAUX

5.1 Historique du glissement du Billan

Dès juin 1981, la stabilité de la nouvelle route (CD526) a attiré l'attention. Par crainte de petites loupes ponctuelles de glissement - un mouvement de grande ampleur ayant été jugé improbable -, un premier dispositif d'auscultation altimétrique (Fig. 6) a été mis en place sur la route entre le ruisseau du Buyant (ou le Rieu Claret) à l'amont et le ravin de Courbassière à l'aval (13 repères sur 550 m). Cette surveillance devait prévenir tout incident pendant l'exploitation du gîte de matériaux situé en pied de versant (Fig. 7).



Figure 6 : dispositif n°1 entre le ravin de Courbassière et le ruisseau du Buyant (550m)

A cause de l'enneigement, la saison de mesures se limite généralement de juin à novembre. Aucune mesure n'est effectuée pendant l'hiver et c'est donc à la 1<sup>ère</sup> opération de la saison estivale que l'on découvre les évolutions éventuelles liées à la fonte.

<u>Pendant la 1<sup>ère</sup> période</u> (entre le 11/09/1981 et le 15/07/1982), il a été procédé à 5 opérations de nivellement direct de précision ( $\pm$  1mm/km) car les mouvements étaient supposés faibles et devaient donc être décelables. La fréquence de mesures initiale était de 2 opérations par saison estivale.

<u>Pendant la 2<sup>e</sup> période</u> (entre le 02/08/1982 et le 08/10/1984), le nivellement direct ordinaire a été préféré car suffisant en précision (+/- 5mm/km), compte tenu des déplacements mesurés. La fréquence a été augmentée en 1982 (1 opération par mois) puis s'est limitée à nouveau à 2 opérations par saison estivale.

Ce dispositif a mis en évidence des déplacements significatifs de certains points et indiqué que la zone d'instabilité était plus étendue que prévue. L'accélération des déplacements est mise en évidence (Fig. 7).



Figure 7 : évolution des tassements cumulés des repères de nivellement du CD 526 jusqu'à fin 1984

Par crainte de détection de mouvements superficiels liés uniquement à la route, un deuxième dispositif (dispositif n°2) a été substitué au premier, fournissant de meilleures garanties de pérennité et de fiabilité des repères car ceux-ci ont été ancrés en dessous de la fondation de la route par scellement dans un forage (15 repères situés sur le même tronçon). Une opération commune avec le dispositif n°1 a été effectuée pour assurer la continuité.

Trois opérations de nivellement direct de précision ont été menées entre le 08/10/1984 et le 09/10/1985.

Les tassements enregistrés ont confirmé les premières observations quant à la localisation de la zone sensible et indiqué une augmentation de la vitesse de déplacement.

L'accès à Grand'Maison étant impossible chaque année de novembre à fin mai à cause de l'enneigement, aucune mesure n'a été effectuée pendant cette période.

## 6. FAITS OBSERVES EN MAI 1986 ET ACTIONS IMMEDIATES

Le 26 mai 1986, la retenue de Grand'Maison était dans sa troisième et dernière année de remplissage. Le plan d'eau était à la cote 1674 environ et la cote de retenue normale 1695 devait être atteinte à fin juillet.

Ce jour là, la tournée quotidienne effectuée par les surveillants en poste au bâtiment de surveillance révéla des fissures dans le revêtement bitumineux et un affaissement sur le CD 526 alors en cours de déneigement, dans le secteur compris entre le ravin de Courbassière et le torrent de Rieu Claret, à environ 2 km à l'amont du barrage de Grand'Maison. Des repères provisoires de déformations furent mis en place ce jour.

Le 27 mai, une augmentation de l'ouverture des fissures de près de 1cm fut constatée et une crevasse fut découverte dans le versant dominant le CD 526 (Figure ), à environ 70 m au-dessus de la route (à 1850 m), longue de 250 m environ et d'environ 50 cm de rejet vertical [2].



*Figure 8* : Crevasse de tête du glissement [4]

## 6.1 Dispositions d'urgence

#### 6.1.1 *Mesures d'ouverture de crevasse*

Un dispositif d'auscultation permettant de suivre l'évolution de l'ouverture des fissures sur la route et de celle de la crevasse fut mis en place :

- clous sur la chaussée de part et d'autre des fissures: 11 points de mesure,
- tiges métalliques de part et d'autre de la crevasse : 5 points de mesure.
  - (dès le 28/05/1986 mesures/2xjour sur les 5 points).

Il fut complété le 31 mai par la pose d'un téléfissuromètre à fil tendu type LCPC, sur la crevasse principale à 1875 NGF, permettant un suivi en continu de l'évolution et utilisé comme dispositif d'alerte relié à une alarme (mesure journalière à partir du 1er juin).

## 6.1.2 Baisse du plan d'eau

Pour réduire le risque de submersion possible du barrage par une vague induite par un glissement de grande ampleur dans la retenue, la baisse du plan d'eau a été engagée rapidement à la vitesse d'un mètre par jour jusqu'au 14 juin.

Ce gradient a été retenu d'un commun accord avec la DRIRE<sup>2</sup>.

#### 6.1.3 Nivellement

Le nivellement des repères du dispositif n°2, réalisé en urgence le 28 mai, a mis en évidence:

- un tassement très significatif au cours de l'hiver 1985-1986 (Fig. 9);
- une vitesse de déplacement importante le 28 mai ; cette vitesse s'est confirmée toute la semaine qui a suivi avant de se stabiliser progressivement. Les mesures d'écartement de la faille confirmaient cette tendance. Vers le 10 juin, le glissement entrait dans une phase de stabilisation relative.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> DRIRE : Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement



Figure 9 : Evolution des tassements cumulés des repères de nivellement du CD 526 jusqu'au début de saison 1985

#### 6.1.4 Décisions rapides

Une analyse rapide des faits conduisit EDF à attribuer le déclenchement (ou la réactivation) de ce glissement à la remontée exceptionnelle de la piézométrie consécutive à un gradient de fonte très important. Il fut alors décidé :

- de mettre en place un dispositif d'auscultation du versant dont une partie serait télétransmise au bâtiment de surveillance du barrage, pour pallier à l'inaccessibilité du versant environ six mois sur douze ;
- de réaliser une étude géologique pour reconstituer la géométrie du glissement et son mode de genèse et prévoir son évolution;
- de réaliser un dispositif de drainage du versant afin d'éviter que de telles remontées piézométriques ne se reproduisent en période de fonte;
- de poursuivre les investigations et les calculs de stabilité afin de vérifier que les marnages de la retenue ne diminueraient pas la sécurité ;
- de réaliser une étude sur modèle physique au 1/200e pour étudier la propagation des ondes dans la retenue consécutivement à différents types de glissement.

## 7. DISPOSITIF DE DRAINAGE

Un mois après la détection du glissement, la décision de forer une galerie dans le cristallin avec voile de drainage a été prise. Le dispositif de drainage constitué d'une galerie de 800 m de longueur (Ø3.60m à piédroits verticaux), entrant à la cote 1712, équipée de 29 forages drainants ascendants (Ø105mm) d'une longueur cumulée de 1390 m, fut réalisé avant l'hiver 1986-87 et fut donc opérationnel dès le printemps 1987 (Fig. 10).

La variation du niveau piézométrique dans le versant pendant la fonte des neiges est mise en évidence (Fig. 11).



*Figure 10* : tracé de la galerie de drainage



*Figure 11* : variation du niveau piézométrique dans le versant, étudiée en 1987 (profil central 506) [5]

#### 8. DISPOSITIF D'AUSCULTATION ETENDU ET EVOLUTION DU PHENOMENE

Ce dispositif mis en place à l'été 1986 est constitué de deux systèmes de surveillance : l'un automatique, télétransmis, opérationnel toute l'année et l'autre manuel utilisable à la saison « estivale » [6] .

Bien que cet article soit consacré à l'auscultation topographique, celle-ci ne peut être dissociée des autres moyens de mesures mis en place qui peuvent apporter des informations supplémentaires, permettre une corrélation sur une reprise ou une atténuation du phénomène et imposer une fréquence de mesures plus élevée. Les autres dispositifs « non topographiques » sont donc décrits brièvement.

#### 8.1 Dispositifs d'auscultation automatique et télétransmise fonctionnant en toutes saisons

Ces systèmes et appareils sont généralement moins précis mais destinés à être mesurés en toutes saisons par télémesure (Fig. 12) :

- <u>Cellules de pression interstitielle</u> : L'objectif principal est de suivre l'évolution de la piézométrie en fonction de la fonte des neiges ou des précipitations importantes, et de vérifier de ce fait l'efficacité du dispositif de drainage (galerie et forages), réalisé fin 1986.
- <u>Forages équipés de sondes inclinométriques (Clinofor)</u>: deux forages sur le profil central du glissement (506) sont équipés de sondes inclinométriques permettant des mesures dans deux directions orthogonales.
- <u>Forages équipés de capteurs extensométriques (Distofor)</u> : en profondeur, deux forages de 60 m environ, réalisés à partir de la galerie, sont équipés de capteurs extensométriques tous les 10 m, associés à des capteurs de déplacement placés en tête de forage.
- <u>Capteurs de déplacement de surface, placés de part et d'autre de la crevasse principale</u> : les mouvements relatifs des deux lèvres de la crevasse principale sont observés suivant deux directions : le rejet vertical et l'ouverture suivant la ligne de plus grande pente.
- <u>Extensomètre à fil tendu (type LCPC) sur crevasse principale à 1875 NGF</u> : Ces mesures sont poursuivies depuis sa mise en place, dès la situation de crise.
- <u>Mesure de débit d'exhaure de la galerie de drainage par capteur</u> : le débit d'exhaure de la galerie de drainage est mesuré dans un déversoir permettant d'effectuer une mesure de hauteur d'eau avec un capteur télétransmis.



Figure 12 : dispositif d'auscultation automatique [7]

#### 8.2 Dispositifs de mesures manuelles "estivales"

Ces systèmes et appareils pérennes ont été mis en place et auscultés depuis l'été 1986, mais ne pouvaient faire l'objet de mesures qu'en période estivale.

#### 8.2.1 Auscultation géodésique d'urgence

L'objectif de ce dispositif a été de mesurer des déplacements horizontaux et verticaux de repères de surface afin de définir les géométries et les volumes de glissements potentiels. Ce dispositif a été utilisé entre le 01/06/1986, soit 48h après la demande, et le 03/11/1988.

A la 1ère mesure du 01/06/1986, il comprend 10 points sur 1 profil; les repères sont constitués de barres d'acier de 2 m enfoncées à refus surmontées de tiges inox accueillant des réflecteurs à demeure ; les points sont déterminés par mesures d'angles et de distances depuis les 2 piliers en béton construits spécialement sur la même rive. La fréquence des mesures est journalière.

En quelques jours, le nombre de repères est augmenté jusqu'à 50; la quantité de prismes à demeure nécessaire devenant excessive, la méthode de détermination est changée : 3 piliers supplémentaires sont construits sur la rive opposée et les repères sont déterminés uniquement par intersections de visées angulaires.

Le dispositif mis en place dés le 30 mai 86 était relativement sommaire et sa vulnérabilité vis-à-vis des chutes de pierres et du manteau neigeux était importante. Ce dispositif a été complété et remplacé par des repères en inox conçus démontables (en fin de saison 1986). Ils se composent de barres cylindriques surmontées d'une boule de visée, qui viennent se visser sur des ancrages de modèles différents selon la nature du sol. 35 repères sont ainsi équipés (Figure 13).



Figure 13 : dispositif géodésique d'urgence (en bleu) avec son réseau de 5 piliers d'observations

La fréquence de mesure a été la suivante : journalière les 6 premiers jours de juin 1986, progressivement réduite pour arriver à hebdomadaire fin 1986, hebdomadaire puis mensuelle en 1987, mensuelle en 1988 ; la fréquence est toutefois toujours hebdomadaire entre les 2 premières opérations de la saison.

Plusieurs phases de déformations ont été distinguées [9] :

1<sup>er</sup> dispositif qualifié de « sommaire » (jusqu'au 04/11/1986)

- Pendant une période couvrant les premiers jours de juin, les mouvements ont été importants (Fig. 14)
- Sur la période suivante de 10 semaines : les mouvements ont encore été significatifs mais lents attribués à l'évolution naturelle du versant sous l'effet du fauchage du Lias et au gré notamment des conditions hydrogéologiques (Fig. 14) ;



Figure 14 : vecteurs déplacements des repères géodésiques du profil central (506)<sup>3</sup>

• Jusqu'à la fin d'année 1986 (04.11.86), hormis quelques repères présentant manifestement des déplacements aberrants, l'ensemble des points a présenté des déplacements non ou peu significatifs car trop proches de la marge d'incertitude.

2<sup>er</sup> dispositif qualifié de « pérenne » (jusqu'à fin 1988)

• Jusqu'à la fin d'année 1988 (03.11.88), hormis quelques repères présentant manifestement des déplacements aberrants, l'ensemble des points a présenté des déplacements non ou peu significatifs car trop proches de la marge d'incertitude.

#### 8.2.2 *Repères altimétriques du CD526*

Ce dispositif permet d'obtenir une information très intéressante sur la déformée longitudinale de la route dans tout le secteur. En particulier, c'est ce dispositif qui a mis en évidence que la partie centrale était la plus sensible et permis de choisir le profil type (506-Figure ) à ausculter ultérieurement par d'autres dispositifs.

Le dispositif CD526-n°2 (existant avant la crise) a été mesuré jusqu'au 09/12/1986.

La fréquence des mesures de nivellement direct de précision a été la suivante :

- journalière du 28/05/1986 au 27/06/1986 ;
- 2 à 3 fois par semaine jusqu'au 29/08/1986 ;
- 3 fois par mois jusqu'au 09/12/1986.

Comme indiqué précédemment, le glissement commence à se stabiliser vers le 10 juin. Jusqu'à fin 1986, les vitesses de déplacement ont été très faibles (Fig. 15).

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Il est indiqué le cercle de glissement le plus défavorable, déterminé par l'étude de stabilité (chap.6.1.4.)



Figure 15 : évolution du tassement cumulé du repère central 38506 (CD526) depuis le 28/05/1986 (début de crise)

A partir du 11/07/1986, le dispositif CD526-n°2 a été étendu pour couvrir l'ensemble de la rive droite jusqu'au barrage (60 repères-dispositif n°3). Ce dispositif CD526-n°3 est encore utilisé aujourd'hui (Fig. 16).



Figure 16 : dispositif altimétrique n°3 du CD 526 (en rouge)

La fréquence des mesures de nivellement direct de précision était la suivante :

- en situation normale, 1 opération par mois ;
- en situation renforcée (remplissage), 1 opération par semaine ;
- en situation de fonte, 3 opérations par semaine.

Le nivellement des points situés dans la zone aval du ravin de Courbassière montre des vitesses très faibles. Dans la zone amont, on observe des tassements un peu plus importants dus à la présence d'une matrice rocheuse en pied de versant plus désorganisée composée de schistes du Lias. La répartition des zones stables et moins stables est pratiquement inchangée depuis l'origine de la surveillance.

#### 8.2.3 Repères altimétriques sur le sentier à 1710

Demandé par la DRIRE en octobre 1986, le dispositif mis en place sur le secteur aval du ravin de Courbassière à la cote 1710 NGF, comprenait 43 repères répartis sur une longueur de 1250 mètres (Fig. 17). Observé par nivellement direct de précision, ce dispositif a été utilisé entre le 26/11/1986 et le 15/11/1988. La fréquence des mesures a été la suivante : 1 opération par mois en situation normale, 1 opération par semaine en situation renforcée (remplissage), 3 opérations par semaine en situation de fonte de neige. Au cours de cette période, les repères ont subi une fluctuation très faible de leurs altitudes, tantôt positive, tantôt négative qui les amène en fin de mesures à des déplacements cumulés quasi-nuls.



Figure 17 : dispositif altimétrique du sentier à 1710 (cote NGF)

#### 8.2.4 Galerie de drainage

Deux dispositifs ont été installés dans cette galerie de drainage qui permet de mesurer les déplacements en profondeur dans le massif instable ; cette galerie rencontre deux fois le contact lias-cristallin. Celui-ci est totalement sain, parfaitement fermé et sec [9].

#### Auscultation altimétrique

Les repères de l'auscultation altimétrique de la galerie de drainage sont rattachés au pilier d'observations situé à l'extérieur de la galerie. Ce pilier d'observations est déterminé par nivellement géodésique à partir des piliers du canevas d'auscultation géodésique (repérés sur figure 18).

Le dispositif comprend 24 repères répartis sur une longueur de 700 mètres. Il a été observé par nivellement direct de précision entre le 09/12/1986 et le 20/11/1988 avec une fréquence de mesures de 4 opérations à la saison 1987 et 2 à la saison 1988.

#### Auscultation planimétrique

Le dispositif d'auscultation planimétrique de la galerie de drainage comprend 6 piliers observés en polygonation de précision<sup>4</sup>. Le piler d'entrée, situé à l'extérieur de la galerie, s'appuie sur les piliers du canevas d'auscultation géodésique. L'objectif était d'obtenir 1 cm de précision sur le pilier situé dans la salle où se trouvent les inclinomètres et extensomètres mesurant le mouvement lias-cristallin.

Ce dispositif a été utilisé entre le 12/12/1986 et le 20/10/1988 avec une fréquence de mesures de 2 opérations à la saison 1987 et 1 à la saison 1988.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Polygonation : ensemble de sommets formant une ligne brisée dont on a pris soin de mesurer les angles ainsi que la longueur des cotés pour ainsi déterminer les coordonnées de chacun de ses sommets.



*Figure 18* : repères d'auscultation altimétrique et planimétrique de la galerie de drainage (en bleu)

Au cours de cette période, les repères altimétriques et planimétriques ont subi une fluctuation très faible, tantôt positive, tantôt négative qui les amène en fin de mesures à des déplacements cumulés quasi-nuls.

#### 8.2.5 Auscultation par photogrammétrie analytique

#### Ce dispositif a été utilisé du 01/09/1986 au 01/10/1995 ;

Les prises de vues aériennes ont été effectuées en septembre 1986 puis 1987, 1988, 1990 et 1995.

Ce dispositif dont le but est de juger du comportement de l'ensemble du massif rive droite jusqu'à des cotes élevées (2200m) couvre donc plus largement le versant mais est ausculté à une fréquence réduite. 352 repères ont été répartis sur la zone auscultée avec un maillage de principe de 100 m x 50 m (Fig. 19).

Ces repères sont constitués de plaques en PVC de 4mm d'épaisseur sur lesquelles ont été imprimées par sérigraphie des cibles blanches de Ø12 cm sur fond noir. Ayant décidé d'une prise de vue oblique, les plaques doivent présenter une direction sensiblement parallèle à l'axe de vol et une inclinaison identique à la pente moyenne du versant : 30 à 40°. Le versant étant le siège d'avalanches et de coulées de neige, chaque plaque est protégée à l'amont par une galette de béton.

La mission photogrammétrique a été confiée à l'Institut Géographique National. La prise de vue est effectuée par une chambre montée sur un support orientable fixé sur les patins d'un hélicoptère. Le recouvrement longitudinal des prises de vue est de 80 %, le recouvrement latéral de 60%.



Figure 19 : dispositif d'auscultation par photogrammétrie

Si le repérage de points de calage au sol (stéréopréparation) a été nécessaire pour les premières opérations, il a été possible ensuite de s'en passer, sans perte de précision significative, et d'exprimer les déplacements par rapport aux repères périphériques du bloc, lesquels sont implantés sur un rocher sain, non fauché, jugé stable.

La compensation des mesures faites sur les clichés par la méthode des faisceaux et une compensation globale par la méthode des moindres carrés, ont permis d'atteindre une erreur moyenne quadratique spatiale de 2 centimètres avec 1,5 cm au maximum sur chacune des 3 coordonnées.

Les zones situées au-dessus de la zone fauchée ont traduit des mouvements très faibles, dans l'incertitude de la mesure. Le reste du dispositif a montré un lent mouvement attribuable au phénomène généralisé de fauchage, avec une accentuation au droit de la zone sensible puisque le matériau incriminé est déstructuré.

#### 8.2.6 Chronologie des dispositifs topographiques (mis en fonctionnement avant la fin d'année 1986)

La chronologie de fonctionnement de tous les dispositifs topographiques décrits précédemment est synthétisée sur la Figure . L'importance des moyens topographiques déployés est mis en évidence sur la figure 20, qui représente l'ensemble des dispositifs en fin d'année 1986, année d'activation (ou de réactivation) du glissement.



Figure 20 : chronologie des dispositifs d'auscultation topographique



Figure 21: ensemble du dispositif d'auscultation à fin 1986

#### 8.2.7 Autres dispositifs « non topographiques » utilisables en saison estivale

- <u>Inclinomètres pour les mesures de déformation en profondeur</u> : huit sondages carottés de 100 m environ ont été équipés de tubes rainurés pour faire l'objet de mesures inclinométriques ;
- <u>Piézomètres manuels pour la surveillance de la nappe de versant</u> : sur l'ensemble du versant, 24 piézomètres manuels ont été installés ;
- <u>Sources</u> : 9 sources dont le débit a été mesuré.

#### 8.3 Mesures de nivologie

La fonte du manteau neigeux est le moteur essentiel, via la piézométrie du versant, dans la rhéologie de ce glissement. Il est donc indispensable de mesurer l'évolution du manteau alors que le site est encore difficilement accessible.

Deux méthodes complémentaires ont donc été retenues :

- <u>Sondages manuels</u> : série de 8 sondages réalisée 6 fois au cours de l'hiver sur le versant du glissement.
- <u>Télénivomètre autonome</u>: dans un massif adjacent (les Sept Laux) à 2200 d'altitude, il mesure automatiquement et quotidiennement la "valeur en eau" du manteau neigeux. Le suivi des

fluctuations de la valeur en eau totale du manteau permet de quantifier le gradient de la fonte et de son influence vis à vis de la montée de la piézométrie dans le versant.

## 9. CARACTERISATION DU GLISSEMENT DU BILLAN

Le glissement du Billan a été stabilisé par drainage, en permettant de maintenir une piézométrie basse dans le versant, en arrière du contact cristallin/Lias.

Il s'agit d'un glissement composite formé :

- d'une part d'un glissement de type rotationnel 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, directement liés à la piézométrie ; le tassement général du versant s'opère par réajustement du massif suite à son essorage [8].
- d'autre part, de mouvements plus complexes à analyser, de moindre amplitude et moins sensibles à la baisse de la piézométrie (phénomènes de fauchage généralisés du versant).

# 10. ROLE JOUE PAR L'AUSCULTATION TOPOGRAPHIQUE DANS LE CAS DU GLISSEMENT DU BILLAN

Le système d'auscultation n'est efficace que dans son ensemble ; il est souvent difficile d'interpréter telle ou telle mesure isolée présentant une anomalie locale sans que celle-ci soit signalée et confirmée par des appareils différents.

Comme dans toute auscultation, les mesures topographiques présentent l'avantage de donner des valeurs absolues. Cette surveillance topographique a permis de définir l'emprise du glissement, son mécanisme, de vérifier l'efficacité de la galerie de drainage et de servir de dispositif d'alarme en cas d'accélération des mouvements.

Le fait d'avoir pu mettre en place rapidement un système même provisoire d'auscultation, en pleine période de crise, a permis de parfaire la connaissance géométrique du glissement et celle des mécanismes hydrogéologiques qui contrôlent sa stabilité.

Le rôle du dispositif vis à vis de la sécurité de la retenue et des personnes est également important. La surveillance permanente de ce secteur a autorisé la fin de première mise en eau du réservoir (1987) et son exploitation ultérieure.

## 11. DISPOSITIF TOPOGRAPHIQUE ACTUEL

Sur l'ensemble du dispositif d'auscultation topographique mis en place pendant l'été 1986, seule une partie a été maintenue définitivement [10] :

- les repères de nivellement sur la route : dispositif n°3 du CD 526 qui peut être ausculté chaque année de juin à octobre approximativement ;
- les repères géodésiques, partiellement;

A partir de l'année 2000, il a été décidé d'effectuer une mesure tous les 5 ans du dispositif initialement « photogrammétrique » avec une détermination des mêmes 350 points par GPS.

Avec une base constituée de récepteurs fixes sur 3 repères géodésiques stables du canevas de Grand Maison, chacune des cibles est stationnée avec une canne de centrage surmontée d'un récepteur mobile laissé en place pendant 20 à 30 minutes. La précision sur la détermination des coordonnées des cibles par ce mode de mesure est de l'ordre de +/-1 centimètre, respectant le critère fixé initialement (< 2cm).

Pour l'année 2005, vu le ralentissement du déplacement, il a été proposé à la DRIRE d'alléger le dispositif ; le dispositif revu et allégé en concertation avec les géologues d'EDF-TEGG comprend environ 100 points critiques auxquels il a été rajouté 10 points nouveaux dans les zones sensibles (Fig. 22).

En 2010, la mesure des mêmes points a été reconduite.





Figure 22 : dispositif d'auscultation par GPS

Figure 23 : vecteurs déplacements entre 1986 et 2010 (planimétrie en rouge et altimétrie en vert)

Un léger amortissement des tassements se poursuit dans la zone la plus active (Fig. 23). L'enneigement et la fonte du stock de neige au printemps peuvent jouer cependant un rôle important dans la cinétique du glissement, comme en 2008, année qui a été marquée par un enneigement important et des précipitations exceptionnelles.

# **12. CONCLUSION: BILAN TECHNOLOGIQUE DE L'AUSCULTATION TOPOGRAPHIQUE ET PERSPECTIVES**

La description et l'analyse des dispositifs et techniques topographiques employés au cours du temps permettent d'établir un retour d'expérience sur l'utilisation de méthodes qui pourraient pour certaines par leur simplicité et leur robustesse être reconduites et pour d'autres remplacées par des techniques nouvelles.

Les différents dispositifs devaient satisfaire à des critères d'aptitude à la cinétique de glissement et de précision des mesures. La précision des mesures avait été fixée à moins de 2 cm sur le versant et quelques mm sur la route.

Les nivellements sont adaptés pour une cinétique rapide ; leur mise en œuvre est aisée, exige peu de personnel, peu de matériel, est peu coûteuse, très précise et fournit des résultats immédiats ; la fréquence des mesures peut être augmentée immédiatement en cas de crise ; La méthode de nivellement direct n'a pas évolué depuis 25 ans car elle reste toujours la méthode la plus précise en altimétrie (en comparaison au nivellement indirect et au GPS); par contre, le matériel a été automatisé par l'utilisation d'un niveau numérique de haute précision avec mire invar à code barre (précision 0,3mm/km).

De même, l'auscultation par visées lointaines sur cibles (type « géodésie d'urgence ») répond à la cinétique rapide ; les moyens matériels à disposition sont plus importants aujourd'hui qu'ils ne pouvaient l'être à l'époque : voyants de taille plus réduite, multidirectionnels ce qui évite de devoir les réorienter vers les stations de visée, théodolites motorisés (ex : surveillance par EDF-DTG du glissement du Chastel au bord de la retenue de Puylaurent en Lozère[2]);

L'auscultation du versant par GPS peut s'adapter à une cinétique rapide lorsque les points mesurés sont peu nombreux, les récepteurs permanents, les mesures télétransmises. Dans la configuration actuelle, avec une centaine de repères à stationner pendant environ 30 minutes chacun, la fréquence de mesures ne pourrait être augmentée sans changer de mode opératoire. Le dispositif actuel est adapté à une cinétique moyenne voire lente, ce qui est le cas depuis la stabilisation du glissement.

Vu la fréquence de mesures, la photogrammétrie ne pouvait s'adapter qu'à une cinétique lente.

Des facteurs spécifiques à la montagne interviennent indubitablement dans le choix des méthodes topographiques à employer :

- <u>le créneau de mesures</u> (saison, couverture neigeuse, accès) : la route est l'élément du versant accessible en premier ; le nivellement sur la route reste la 1<sup>ère</sup> information de l'année, point clé du dispositif général ; ce dispositif a été d'une importance cruciale dans la gestion de crise car il était existant et donc tout de suite opérationnel, avec des éléments de comparaison immédiatement disponibles ;
- <u>la pérennité des repères auscultés</u> : les repères doivent résister à chaque intersaison (cycles gel-dégel, avalanches, éboulements, opérations de déneigement) ; depuis l'origine, de nombreux repères ont été détruits et remplacés (CD 526 ou versant), ce qui justifie la densité de maillage des points car sinon on perd la continuité de l'information. Le choix des emplacements est du ressort du géologue, qui évitera au mieux la mesure de phénomènes très localisés ou superficiels ;
- <u>l'accessibilité</u> : la mise en place de réflecteurs ou voyants ou récepteurs est longue compte tenu du relief accidenté; les voyants ne peuvent être laissés en place pendant l'hiver ; pour preuve, de nombreuses cibles de « photogrammétrie » ont du être remplacées.
- <u>les moyens humains et la qualification nécessaires</u> : les repères ne sont accessibles qu'à des guides ou du personnel formé aux travaux en montagne; si ces repères doivent être surmontés de cibles, de voyants, ceux-ci sont à positionner avec rigueur et précision car les résultats des mesures en dépendent.

Les méthodes employées pour le suivi du glissement du Billan depuis son activation semblent parfaitement adaptées à sa problématique.

Pour une auscultation par visées à distance sans cibles, la technique INSAR (Interferometric synthetic aperture radar)<sup>5</sup> pourrait être envisageable. Elle permettrait de réaliser des mesures assez fréquentes (tous les 3 jours par satellite récent, au moins journalière par INSAR terrestre<sup>6</sup>). Mais les limites de la méthode sont les suivantes :

- les mouvements estimés sont de l'ordre du cm, mais en général il n'est pas possible de faire des estimations ponctuelles, seulement des analyses d'ensemble pour identifier des phénomènes macroscopiques, sachant que le pixel d'une image radar est de 2x2m pour un satellite récent ;
- en montagne, une partie de la surface ne peut pas être imagée en raison d'une inadéquation entre l'orientation des pentes (visées perpendiculaires aux versants) et les paramètres de prise de vue. Ces contraintes géométriques empêchent de caractériser les glissements de terrain situés dans ces zones d'ombre. Il faut donc utiliser des combinaisons de différents types d'orbites de satellites, de manière à couvrir des surfaces assez importantes, mais il subsiste toujours des zones d'ombre. L'INSAR terrestre peut remédier à ce problème mais la technique est pour l'instant lourde à mettre en œuvre (ex. radar de Séchilienne[11]), avec toutefois des développements en cours intéressants [12,13];
- il faut identifier des points « naturels » qui renvoient correctement et systématiquement le signal radar et les retrouver à l'opération suivante ;
- une excellente précision est obtenue sur des coins réflecteurs artificiels passifs mais de fait les moyens matériels limitent la couverture du site ; un coin a une dimension non négligeable de 60 cm.

Cette technique, qui a prouvé son efficacité sur des sites adaptés, est en cours de qualification à EDF. Elle n'est pas utilisable de façon systématique, surtout en montagne.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Insar: l'interférométrie radar (InSAR) est une technique d'imagerie qui permet de déterminer des déplacements de la surface de la Terre, en exploitant la relation entre le déphasage de 2 signaux et l'altitude du terrain.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> GBInSAR (Ground-Based Interferometric SAR)

## REMERCIEMENTS

M. Gérard CHAZALET, géomètre-expert, ancien chef de la division Topographie d'EDF-Lyon, en responsabilité du glissement du Billan, de 1981 à 2005.

Mme Anne ZOBOUYAN, chef du service Ingénierie Topographie d'EDF-DTG Lyon ;

M. Rémy BOUDON, expert au service Ingénierie Topographie d'EDF-DTG Lyon ;

M. Rémy HUBER, chef du Centre Régional d'Auscultation (CRA) de Grenoble, EDF-DTG

Mme Mélanie ANTHEAUME, ingénieur, EDF-DTG CRA de Grenoble

## RÉFÉRENCES

[1] « Journée Technique organisée sur l'Aménagement de Grand' Maison »

CFBR, 21/10/2006, Chapitre 11 : le glissement du Billan

[2] « Mouvements de versants des retenues hydroélectriques, retour d'expérience et gestion du risque"

Revue Française de Géotechnique, n°95-96, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> trimestres 2001,

G. Thomaïdis, G. Deveze, J.-Y. Dubie

[3] « Aménagement de Grand' Maison - montagne du Billan – optimisation du dispositif d'auscultation géodésique », EDF-TEGG, E-D-T-GG/040163A, 26/11/2004,G. Deveze, G. Chazalet

[4] « Le glissement de Vajont, ses enseignements et ses retombées pour EDF et les exploitants de barrages"

Revue Française de Géotechnique, n°131-132, 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> trimestres 2010, G. Castanier, EDF-TEGG

[5] « Glissement du Billan, Relation entre nivologie, pluviométrie, piézométrie et débit de drainage »

Rapport interne, EDF-REAL, E.REAL.EPH2.1987.029A, août 1987, Puertas, Guitton

[6] « Télétransmission de l'auscultation d'un glissement: retenue de Grand'Maison, glissement du Billan''

Comptes rendus du cinquième symposium international sur les glissements de terrain, Lausanne, 10-15 juillet 1988, J.Y. Dubie, P. Benefice, C. Guitton

[7] « Glissement du Billan »,

Dossier de présentation au CTPB, EDF-REAL, 5 septembre 1986

[8] « Glissement du Billan »

Dossier complémentaire de présentation au CTPB, EDF-REAL, 1er mars 1987

[9] « Aménagement de Grand' Maison ; glissement du Billan, Dossier géologique complémentaire » Rapport interne, EDF-TEGG, E.TEGG.GG.87.015A, mars 1987, P. Benefice, J.P. Blais, J.Y. Dubie

[10] Rapports biennaux d'auscultation des rives de Grand' Maison

[10] Rapports biennaux d auscultation des rives de Grand M

EDF-DTG Centre Régional d'Auscultation de Grenoble

[11] « Ground radar for monitoring of landslides"

Rock Mechanics » - Mars 2002, J.P. Duranthon, F. Lemaître

[12] « Monitoring, prediction, and early warning using ground-based radar interferometry »

N. Casagli, F. Catani, C. del Ventisette, G. Luzi, Landslides 2010

[13] « Displacement patterns of a landslide affected by human activities: insights from ground-based InSAR monitoring »

F. Bozzano, I. Cipriani, P. Mazzanti, A. Prestininzi, 2011