

## **ANALYSE MULTI-PROXY DE FORAGES DANS DES ARGILES GLACIO-LACUSTRES QUATERNAIRES (GLISSEMENT D'AVIGNONET, FRANCE)**

## **MULTI-PROXY ANALYSIS OF BOREHOLES IN REMOLDED QUATERNARY PARAGLACIAL DEPOSITS (AVIGNONET LANDSLIDE, FRANCE)**

Grégory BIÈVRE<sup>1</sup>, Christian CROUZET<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, Univ. Gustave Eiffel, ISTerre, 38000 Grenoble, France

**RÉSUMÉ** – Le glissement d'Avignonet (Isère) est constitué de sédiments paraglaciacs quaternaires parmi lesquels des couches de till, glacio-lacustres et fluviatiles imbriquées. De nombreux forages ont été réalisés au milieu des années 1980 et 2010 pour préciser le cadre géologique et géotechnique de la partie habitée, au sud, de ce glissement de terrain lent. Les paramètres mesurés sont très hétérogènes et rendent l'interprétation difficile. Dans ce travail, il a notamment été cherché à combiner ces différents paramètres pour produire un modèle géologique. Les résultats révèlent une grande complexité géologique avec l'intrication de diverses unités sédimentaires. Deux anciens glissements de terrain de plusieurs dizaines de mètres de large ont été identifiés. Ce travail montre l'intérêt d'une approche multi-proxy dans les études impliquant des unités sédimentaires du Quaternaire.

**ABSTRACT** – The Avignonet landslide (Isère, France) is made of Quaternary paraglacial sediments including imbricated units of till, glaciolacustrine and fluvial layers. Numerous boreholes were drilled in the mid-1980s and 2010s to detail the geological and geotechnical framework of the inhabited part, to the south, of this slow-moving landslide. The measured parameters are very heterogeneous and make interpretation difficult. In this work, the aim was to combine these different parameters to produce a geological model. The results reveal a high geological complexity with the imbrication of various sedimentary units. Two ancient landslides, several tens of metres wide, were also identified. This work shows the interest of a multi-proxy approach in studies involving Quaternary sedimentary units.

### **1. Introduction**

Le glissement d'Harmalière (Isère, France) s'est réactivé brutalement en mars 1981. Un lotissement d'habitations en construction au sein du glissement d'Avignonet, immédiatement au nord du glissement d'Harmalière, a également été affecté à cette date et de nombreuses maisons ont montré des désordres. De nombreuses études géotechniques, qui ont notamment compris plusieurs sondages, ont été initiées dans les années 1980 pour mieux comprendre l'origine de ces désordres et comprendre le fonctionnement du glissement. Durant les années 2010, des sondages supplémentaires ont été réalisés, notamment pour calibrer des campagnes géophysiques et d'instrumentation.

La diversité des sondages (carottés, destructifs) et des paramètres mesurés (paramètres de forage, diagraphies, essais sur échantillons, prélèvements pour datation, etc.) rend leur interprétation conjointe difficile. L'objectif de ce travail est de produire un modèle géologique du site à partir de la combinaison de ces données variées. Pour cela, il a notamment été cherché à valoriser les sondages destructifs, en déduisant des paramètres mécaniques à partir des paramètres de forage, et à les interpréter conjointement avec les logs des sondages carottés. Dix sondages ont été utilisés dans ce travail, en complément d'observations de terrain et de datations.

## 2. Site d'étude

Le site d'étude est le glissement d'Avignonet situé dans la région du Trièves en Isère (France; figure 1a). La géologie est principalement contrôlée par l'histoire quaternaire du site, avec des alternances de périodes glaciaire et interglaciaire. Notamment, durant le dernier maximum glaciaire, il y a 30 à 50 ka dans le secteur (Bièvre and Crouzet, 2021), une diffiusion du glacier de la Romanche a progressé vers le sud et a barré le cours du Drac et de ses affluents au niveau du plateau de Sinard. Il en a résulté un lac de barrage glaciaire qui a permis l'accumulation de plusieurs dizaines à centaines de mètres de sédiments glacio-lacustres (figure 1b), les Argiles litées du Trièves (Monjuvent, 1973). Lors du retrait du glacier, dont la date reste difficile à préciser, le Drac a entaillé ces formations et a permis l'initiation de nombreux glissements de terrain dans la région. Le versant est du plateau de Sinard est affecté par plusieurs glissements dont ceux d'Avignonet et Harmalière (figure 1a), de dimensions pouvant atteindre 2 km de diamètre et profonds d'environ 30 à 50 m.

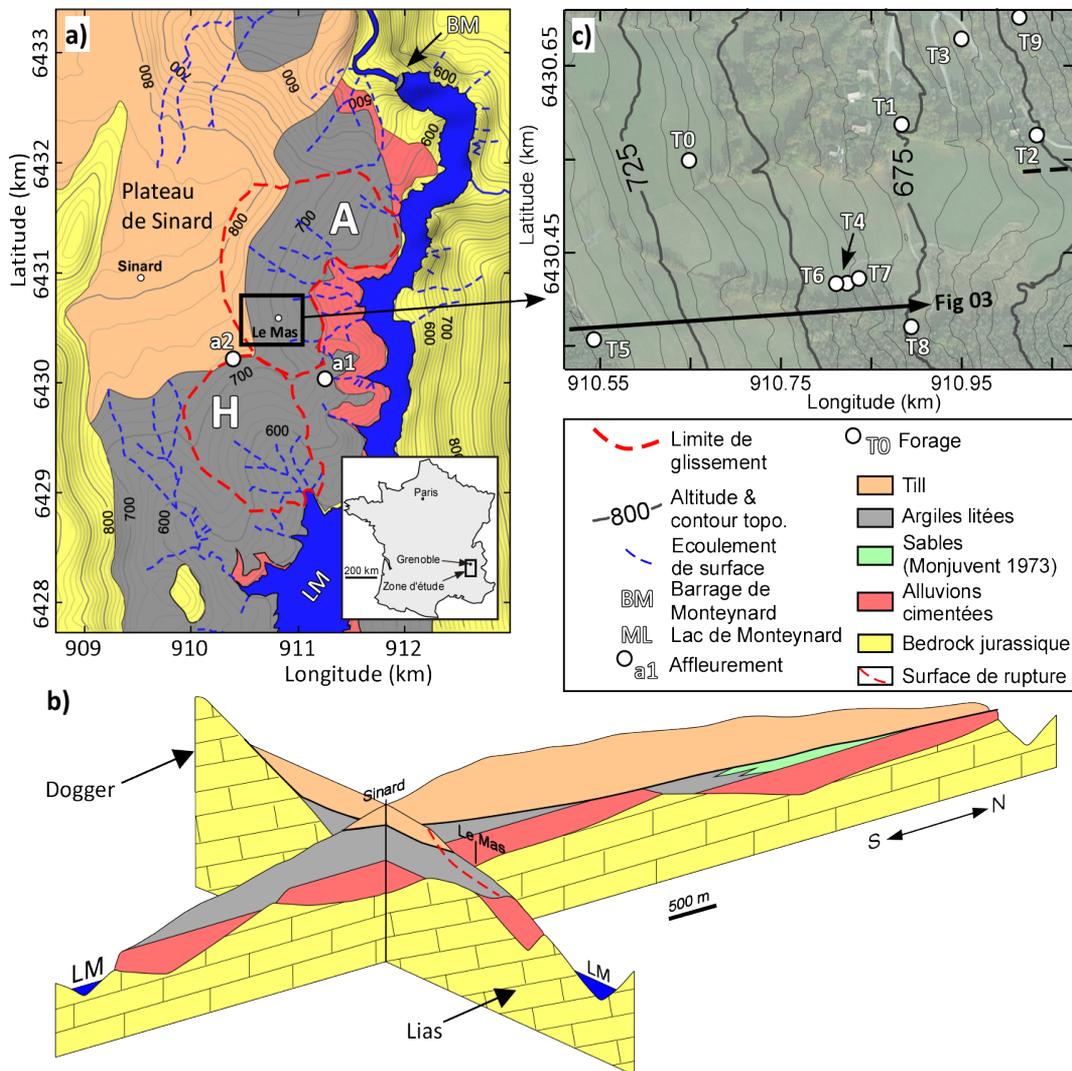


Figure 1. Présentation du site d'étude. a) Carte géologique et localisation des glissements d'Avignonet (A) et Harmalière (H). b) Arrangement géométrique des unités quaternaires sur le substratum jurassique (Monjuvent, 1973). c) Implantation des forages.

### 3. Matériels et méthodes

Dix sondages ont été analysés (T0 à T9). Leur implantation est matérialisée sur la figure 1c et les détails des mesures sont précisés dans le tableau 1.

#### 3.1. Mesures sur échantillons

Des mesures classiques d'identification ont été conduites sur les échantillons en provenance des sondages carottés, comme la teneur en eau ( $W$ ), la distribution granulométrique et le poids volumique ( $\rho$ ). La susceptibilité magnétique ( $SM$ ) a également été mesurée avec un pas de 1 ou 2 cm. Succinctement, cette technique permet de déterminer la teneur en minéraux magnétiques de sédiments et, dans le cas des Argiles du Trièves, ce paramètre est relié à la granulométrie du matériau (Bièvre et al., 2012). L'anisotropie de  $SM$  a également été mesurée sur quelques carottes du sondage T8, avec pour objectif principal d'évaluer sa variation de part et d'autre de surfaces de cisaillement.

Forage	Coordonnées (m, Lambert93)		Date	Altitude (m) / Profondeur (m)	Type	Tests
	Latitude	Longitude				
T0	910648	6430549	Nov 1986	714.9 / 89	Destructif	DPR ( $V_A$ , $P_F$ , $P_O$ ), Inclinomètre (Sep. 1988 à Avr. 1994)
T1	910883	6430587	Nov 1986	675.6 / 59	Carottage	Granulométrie, SM, Inclinomètre (Sep. 1988 à Juil. 1994)
T2	911033	6430576	Nov 1986	650.8 / 17.25	Carottage	Inclinomètre (Sept. 1988 à Fév. 1994)
T3	910950	6430679	Nov 1986	662.4 / 20.5	Destructif	DPR ( $V_A$ , $P_F$ , $P_O$ ), Inclinomètre (Avr. 1987 à Juil. 1994)
T4	910823	6430417	Oct 2007	692.6 / 63	Carottage (0-49.3), Destructif (49.3-63)	$\gamma$ -ray, $W$ , $\rho$ , RCi, RCo, SM
T5	910543	6430357	Oct 2007	742 / 10.6	Carottage	$\gamma$ -ray
T6	910816	6430416	Oct 2007	694.7 / 18.5	Carottage	$\gamma$ -ray
T7	910832	6430420	Oct 2007	689.2 / 18	Destructif	$\gamma$ -ray
T8	910894	6430371	Sep 2011	674.4 / 25.8	Carottage	$W$ , $\rho$ , granulométrie, RCi, SM, ASM, $\gamma$ -ray, Inclinomètre (Juil. 2014 à Oct. 2015)
T9	911012	6430711	Nov 1986	640 / 15.5	Destructif	DPR ( $V_A$ , $P_F$ , $P_O$ )

Tableau 1. Forages utilisés et paramètres mesurés.

Sur les échantillons en provenance de sondages carottés, les résistances au cisaillement (RCi, en kPa) et à la compression (RCo, en kPa) non drainés ont été obtenues avec des outils de poche et avec des pas d'échantillonnage d'environ 10 à 20 cm. Finalement, des datations par radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ) ont été réalisées. Elles ont porté sur des restes végétaux trouvés dans les carottes (à l'intérieur des échantillons, et non sur les bords) ou bien sur des restes végétaux trouvés à l'intérieur de couches à l'affleurement. Finalement, des datations ont été effectuées sur la matrice argileuses d'échantillons issus de carottages ou de prélèvements sur le terrain.

#### 3.1. Mesures en forages

L'indice de Somerton ( $S_D$ , en kPa) permet d'évaluer une résistance mécanique à partir de l'enregistrement de certains paramètres de forage (DPR, pour *drilling parameter recording*), notamment la pression effective  $P_E$  (kPa), la vitesse de rotation  $V_R$  (en nombre de tours par minute), et la vitesse d'avancement  $V_A$  (m/h). Cette relation (Somerton, 1959) a été simplifiée (Laudanski et al., 2013) et peut s'exprimer en faisant le rapport de la pression sur l'outil  $P_O$  (bar) et  $V_A$  (équation 1) :

$$S_D \approx P_E \cdot \sqrt{\frac{V_R}{V_A}} \approx \frac{P_O}{\sqrt{V_A}} \quad (1)$$

Les sondages destructifs avec acquisition des DPR ont été conduits dans les années 1980s (Tableau 1) et les coupes sont disponibles uniquement en format papier. Les graphiques ont tout d'abord été scannés et les courbes ont ensuite été numérisées. Les paramètres individuels ont ensuite été combinés pour déduire l'indice de Somerton.

Les mesures en forage ont également compris des diagraphies comme, par exemple la mesure du rayonnement gamma naturel total ( $\gamma$ -ray, en coups par seconde). Cette mesure classique permet, dans le cas de dépôts sédimentaires comme des argiles lacustres, d'évaluer la variation de la quantité relative d'argiles le long d'une colonne de forages. Finalement, plusieurs sondages ont été équipés avec des tubes inclinométriques.

#### 4. Résultats

Sur les dix sondages analysés pour ce travail, deux seront présentés en détail par la suite, en insistant sur la comparaison entre l'évolution des paramètres mécaniques obtenus à partir de plusieurs méthodes (DPR dans les sondages destructifs et RCi sur les carottes). La figure 2 présente un exemple de combinaison des DPR en indice de Somerton  $S_D$  le long du forage T0, long de presque 90 m et sa comparaison avec la résistance au cisaillement non-drainé (RCi) mesurée sur des échantillons du sondage carotté T4 (localisation des deux sondages sur la figure 1c). Les courbes originales (figure 2a) ont été filtrées à l'aide d'un filtre passe-bas dans le but d'éliminer les variations observées tous les 3 m et qui correspondent à l'adjonction de tiges sur l'atelier de forage. L'interprétation géotechnique est présentée sur la figure 2b. Les fortes variations observées sur les dix premiers mètres (entre 0 et 200 kPa) correspondent à une couche de till qui comprend un mélange de matrice argileuse et de blocs d'origine morainique. En dessous et jusqu'à environ 80 m de profondeur, les niveaux sont des argiles litées. La résistance mécanique augmente depuis environ 35 jusqu'à 115 kPa, avec une augmentation linéaire de 1.1 kPa/m. La pression fluide augmente progressivement elle aussi. Ce gradient linéaire de  $S_D$  est difficilement visible sur les courbes originales (figure 2a). Cette augmentation est en accord avec des observations similaires conduites sur des sédiments marins (Bartetzko and Kopf, 2007) et reflète l'augmentation de compaction causée par la sédimentation. La présence d'une surface de rupture vers 48 m de profondeur semble peu affecter ce gradient de compaction. Ceci suggère une faible déformation, en accord avec les déplacements mesurés d'environ 1 à 2 cm/an pour cette surface de rupture d'après les mesures inclinométriques (Antoine et al., 1981; Lorier and Desvarreux, 2004). En dessous de 80 m,  $S_D$  est constant (environ 80 kPa) de même que la pression fluide (environ 20 bars). Ces niveaux correspondent à des alluvions observées par ailleurs à l'affleurement (a1 dans la figure 1a) à la même altitude.

La résistance au cisaillement non-drainée a été mesurée sur les échantillons prélevés dans le sondage carotté T4 (localisation sur la figure 1c) et les résultats sont présentés sur la figure 2b. La coupe géologique provient de l'analyse directe des échantillons. Depuis la surface et jusqu'à environ 10 m de profondeur, l'allure hétérogène de la RCi correspond à un niveau de till. En dessous et jusqu'à 28.5 m de profondeur, la lithologie est constituée d'alternances de moraines et d'argiles litées et la RCi diminue progressivement de 160 à 40 kPa. En dessous et jusqu'à 49 m, la RCi montre une augmentation irrégulière depuis 80 jusqu'à 110 kPa. Il est notable que les valeurs de résistance obtenues dans T4 en dessous de 28.5 m sont comparables à celles de T0 pour des altitudes équivalentes. Dans T4, des restes végétaux trouvés à 28.5 m de profondeur ont fourni un âge  $^{14}\text{C}$  calibré compris entre 1640 et 1805. Cette observation, en parallèle des résistances qui ne montrent pas de gradient de compaction régulier avec la profondeur, suggère que les premiers 28.5 m au droit de T4 ont été mis en place par un glissement qui s'est produit il y a quelques centaines d'années, à la fin du Petit Âge Glaciaire.

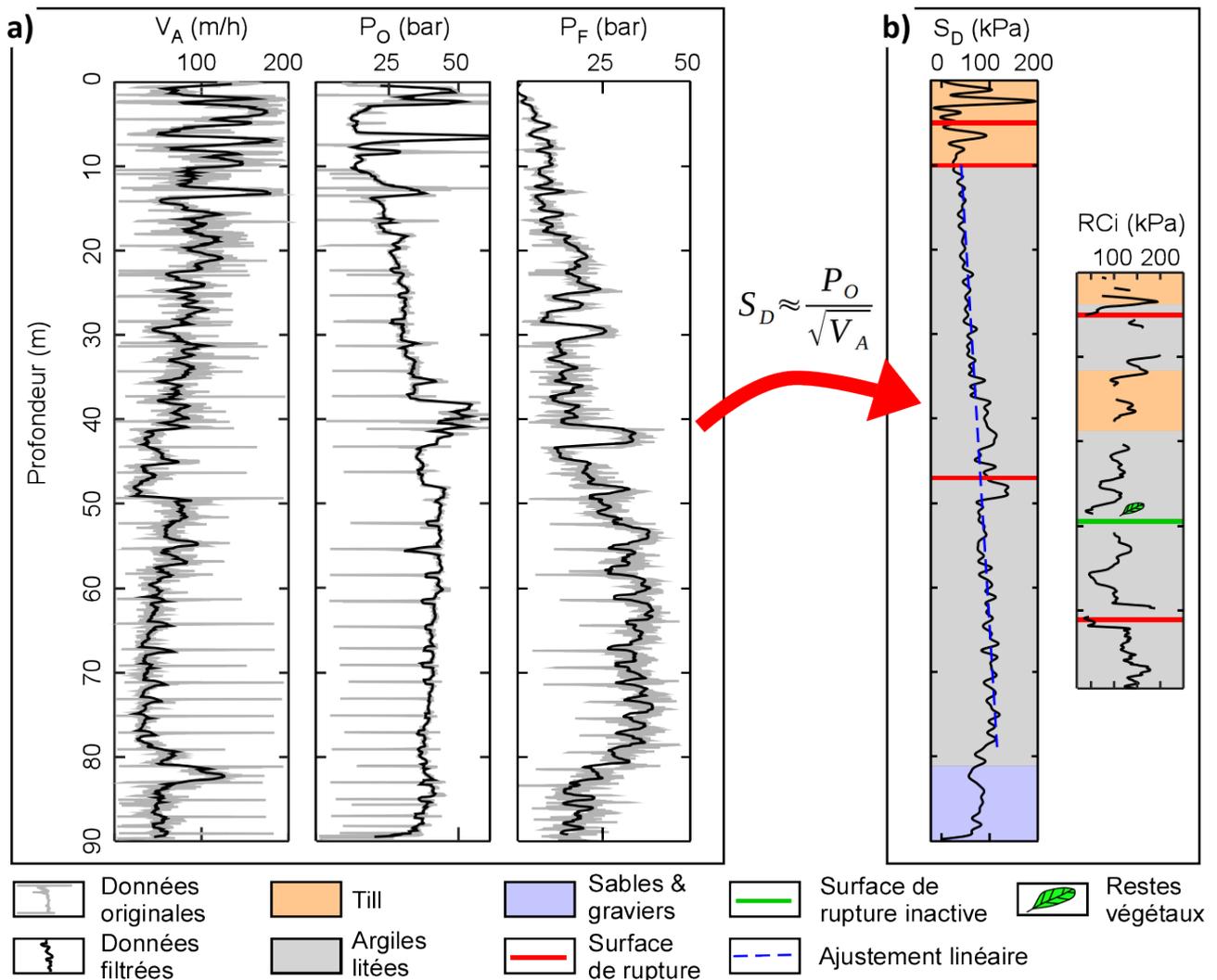


Figure 2. a) Paramètres de forage du sondage T0. b) Détermination de l'indice de Somerton  $S_D$  pour le sondage T0 (à gauche) et interprétation géotechnique. Comparaison avec le sondage T4 et la mesure de la résistance au cisaillement non-drainé (RCi). Les coupes sont positionnées dans le même référentiel d'altitude.

Après avoir analysé l'ensemble des sondages, des coupes géologiques ont été établies. Une de ces coupes est présentée dans la figure 3a et sa localisation est matérialisée dans la figure 1c. La coupe est notamment positionnée au droit du sondage T4 et à proximité de T0. Notamment, il a été tenté de dresser des corrélations latérales à partir des diagraphies de  $\gamma$ -ray, sans succès, par absence de continuité latérale. La réactivation du glissement d'Harmalière, en juin 2016, et qui est situé immédiatement au sud du glissement d'Avignonet (figure 1a), a permis d'observer son escarpement principal (figure 3b). Il est possible d'observer des blocs avec différentes géométries, en contre-pente et également dans le sens de la pente. Par ailleurs, il est possible d'observer des niveaux riches en végétation situés à quelques dizaines de mètres sous l'escarpement principal. Par analogie, il a été possible d'interpréter l'absence de continuité latérale observée entre les différents sondages dans le glissement d'Avignonet et la présence de végétaux récents en profondeur par l'occurrence d'une réactivation locale au sein du glissement d'Avignonet. Cette approche a été adoptée pour plusieurs coupes orientées dans le sens du glissement d'Avignonet (ouest-est) et perpendiculairement au glissement (nord-sud).

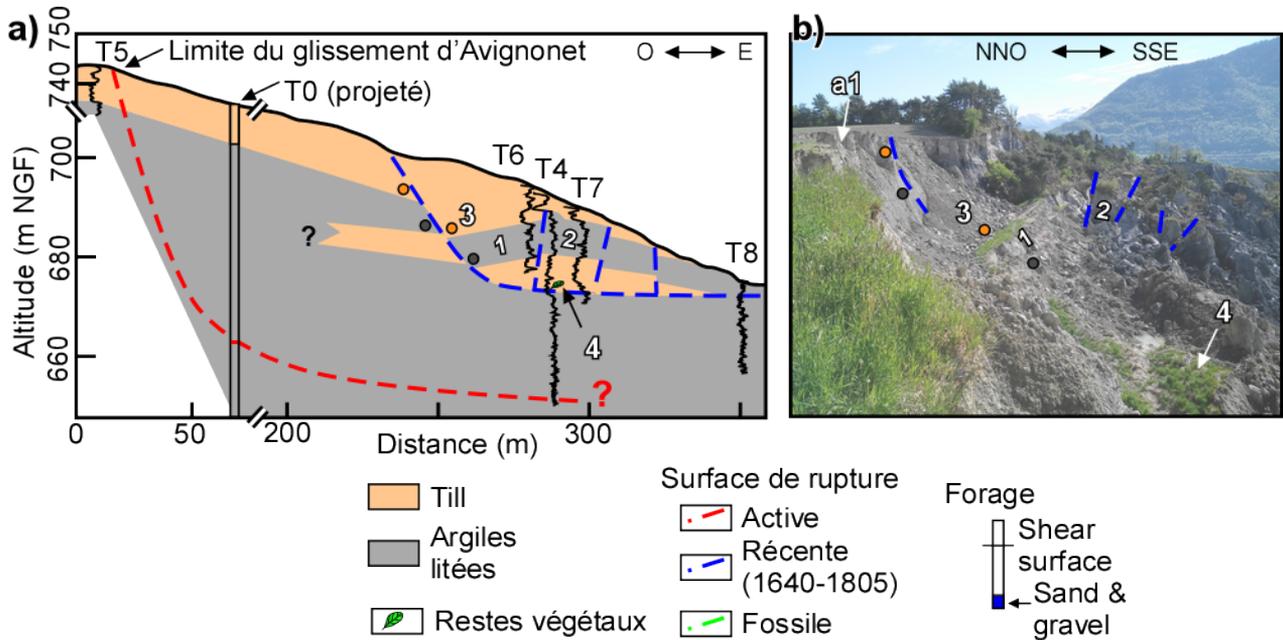


Figure 3. a) Coupe géologique ouest-est (localisation dans la figure 1c). b) Analogie actuelle au niveau de l'escarpement principal du glissement d'Harmalière (photo prise le 10 mai 2017). 1 : Bloc en contre-pente ; 2: bloc dans le sens de la pente ; 3: remplissage par du till ; 4: végétation.

## 5. Discussion

L'analyse de l'ensemble des coupes a permis de construire un bloc-diagramme et de proposer une chronologie, encore mal contrainte toutefois, de l'histoire du plateau de Sinard et du glissement d'Avignonet, depuis le dernier maximum glaciaire. Les résultats sont présentés sur la figure 4. La figure 4a présente le site au dernier maximum d'extension du glacier, il y a environ 30-40 ka. Les oscillations climatiques ont induit des mouvements nord-sud et, conséquemment la succession verticale d'argiles litées lacustres et de niveaux de till mélangé aux argiles lacustres remaniées. Ces niveaux présentent des indentations latérales et sont visibles à l'affleurement. Après le retrait du glacier (date inconnue, mais plus jeune que 30-40 ka), le Drac a incisé ces formations meubles (figure 4b), ce qui a probablement permis l'initiation des glissements. La figure 4c illustre ce phénomène, où un mouvement vertical d'environ 70 m est supposé d'après l'analyse de datations sur plusieurs carottes ainsi que de l'absence de continuité latérale de certains niveaux alluvionnaires grossiers composés de sables et galets (horizon mauve dans la figure). Cette observation suggère une diminution des capacités drainantes à l'intérieur du massif, avec un aquifère potentiellement captif au sein des horizons argileux. Après une période d'érosion et de probable activité du glissement, d'autres phénomènes sont observés, notamment un glissement local entre 1640 et 1805, sur une profondeur d'environ 30 m. D'autres dates confirment cette période d'activité, notamment par des restes végétaux datés du début du XIXe siècle et trouvés enfouis dans le glissement d'Harmalière.

L'ensemble des résultats suggère une activité ancienne du glissement d'Avignonet. Par ailleurs, ils montrent la grande complexité lithologique du site, qui résulte de l'histoire climatique quaternaire mais également de l'activité du glissement.

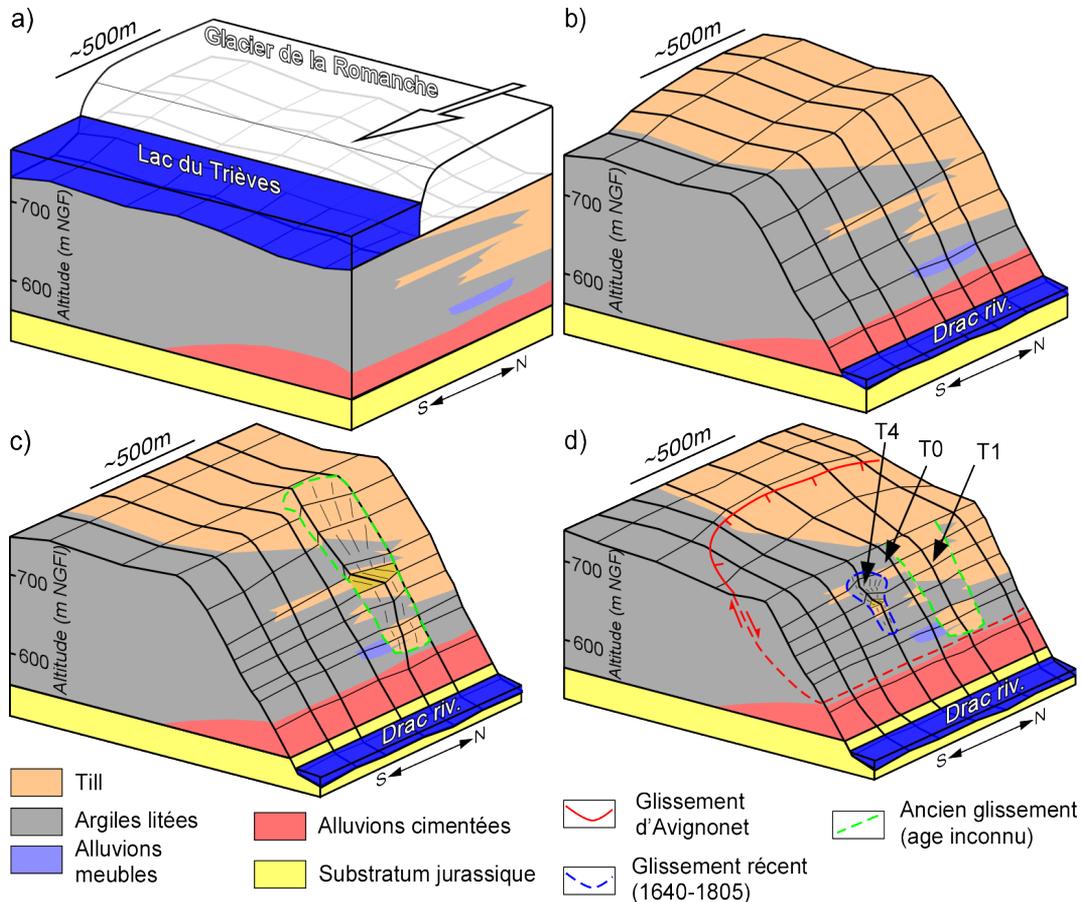


Figure 4. Scénario d'évolution probable du glissement d'Avignonet depuis le dernier maximum glaciaire. a) Situation durant le dernier maximum glaciaire; b) Situation après le retrait définitif du glacier. c) Glissement de rejet vertical 70 m (date inconnue). d) Mouvement vertical de 28 m à la fin du Petit-Âge Glaciaire (1640-1805) et situation actuelle. Quelques forages ainsi que les limites du glissement sont indiqués.

## 6. Conclusions

Dix forages ont été traités en parallèle d'observations de terrain pour établir un modèle géologique et géotechnique du glissement d'Avignonet en Isère. Les sondages destructifs ont pu être valorisés en calculant l'indice de Somerton qui fournit une résistance mécanique. Des essais simples (résistance au cisaillement et à la compression) ont été conduits sur les carottes à l'aide d'outils de poche. Il a été possible de retrouver les différentes unités lithologiques (till, argiles glacio-lacustres, alluvions grossières) mais également d'identifier des zones fortement remaniées qui ne présentent plus de gradient de compaction sédimentaire. Ces résultats montrent la pertinence des paramètres de forage dans ce contexte géologique précis.

Toutefois, il s'est avéré que les datations sont un paramètre crucial pour comprendre l'histoire du site, notamment pour pouvoir expliquer, par exemple, l'absence de continuité latérale des couches localement. Les résultats obtenus suggèrent une grande complexité lithologique du site, de par l'histoire climatique mais également de par l'activité multi-phasée du glissement. De manière plus générale, cette étude montre l'intérêt d'une approche multi-paramètres pour mieux contraindre les contextes géologique et géotechnique des glissements de terrain situés dans des formations paraglaciales quaternaires.

## 7. Références

- Antoine, P., Giraud, A., and Montjuvent, G. (1981) Les argiles litées du Trièves (Isère) ; conditions de gisement et exemples de propriétés géotechniques. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7, XXIII, 117-127.
- Bartetzko, A., and Kopf, A.J. (2007) The relationship of undrained shear strength and porosity with depth in shallow (< 50 m) marine sediments. *Sedimentary Geology*, 196, 235-249. doi:10.1016/j.sedgeo.2006.04.005
- Bièvre, G., and Crouzet, C. (2021) Multi-proxy analysis of boreholes in remolded Quaternary paraglacial deposits (Avignonet landslide, French Western Alps). *Engineering Geology*, 286, 106073. doi:10.1016/j.enggeo.2021.106073
- Bièvre, G., Jongmans, D., Winiarski, T., and Zumbo, V. (2012) Application of geophysical measurements for assessing the role of fissures in water infiltration within a clay landslide (Trièves area, French Alps). *Hydrological Processes*, 26, 2128-2142. doi:10.1002/hyp.7986
- Laudanski, G., Reiffsteck, P., Tacita, J.L., Desanneaux, G., and Benoît, J. (2013) *Experimental study of drilling parameters using a test embankment*. In: Coutinho, R.Q., and Mayne, P.W. (Ed.), *Geotechnical and Geophysical Site Characterization 4*, Taylor & Francis, London, England.
- Lorier, L., and Desvarreux, P. (2004). Glissement du Mas d'Avignonet, commune d'Avignonet. *Proceedings of the workshop Ryskhydrogeo, Program Interreg III, La Mure (France)*.
- Monjuvent, G. (1973) La transfluence Durance-Isère. Essai de synthèse du Quaternaire du bassin du Drac (Alpes françaises). *Géologie Alpine*, 49, 57-118.
- Somerton, W.H. (1959) A laboratory study of rock breakage by rotary drilling. *Petroleum Transaction, AIME*, 216, 92-97.