

Evaluation et prédiction des mouvements des grand phénomènes d'instabilité de pente

Autor(en): **Bonnard, Christophe**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin für angewandte Geologie**

Band (Jahr): **11 (2006)**

Heft 2

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-226172>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Evaluation et prédiction des mouvements des grands phénomènes d'instabilité de pente

Christophe Bonnard¹

Mots-clés: Glissement de terrain, modélisation, prédiction

Résumé

L'analyse des grands phénomènes d'instabilité de pente requiert non seulement une identification des zones instables et de leurs mécanismes de mouvement, confirmé par des données d'auscultation des déplacements à long terme, mais encore une modélisation de leur comportement en cas de crise. En effet, c'est la compréhension du fonctionnement hydrogéologique et géomécanique d'un glissement de terrain au cours d'un épisode de crise, suite à sa modélisation, qui permet de simuler l'effet du changement climatique ou d'ouvrages d'assainissement. Cette approche requiert de bonnes données de base et une détermination des paramètres qui sont parfois entachés d'incertitudes. Mais la calibration des résultats sur la base des données détaillées d'auscultation permet d'assurer la validité des prédictions fournies.

Zusammenfassung

Die Beurteilung grosser Massenbewegungen erfordert nicht allein die Erfassung instabiler Zonen und ihres langfristigen Bewegungsverhaltens, sondern auch eine Modellierung ihres Verhaltens im Falle einer Aktivierung. Tatsächlich bildet erst das auf Modellierungen basierende Verständnis des hydrogeologischen und geomechanischen Verhaltens einer Rutschung im Falle einer aktiven Phase die Grundlage für die Beurteilung der Einflüsse von klimatischen Veränderungen oder von Sanierungsmassnahmen. Dieser Ansatz erfordert gute Grundlagendaten und die Bestimmung von Parametern, welche manchmal mit Ungenauigkeiten behaftet sind. Die Kalibrierung der Resultate anhand detaillierter Beobachtungen erlaubt es indes, die Zuverlässigkeit von Prognosen abzusichern.

1. Introduction

Les grands glissements de terrain, qui sont souvent la raison des instabilités de pente affectant des versants entiers, de plus en plus bâtis suite à la pression du tourisme, constituent un phénomène significatif sur tout le territoire suisse, notamment dans les Préalpes (VD, FR, BE, SZ en particulier). Ces grandes zones instables, dont l'activité plus ou moins permanente peut durer pendant des siècles, voire des millénaires, sont aussi parfois le siège de phases d'accélération, d'une durée de quelques semaines à quelques mois, qui représentent un problème considérable pour la gestion de ces versants et des ouvrages qui peuvent s'y développer, tant par l'effet de leur intensité (accroissement des vitesses) que par leur

¹ Laboratoire de Mécanique des Sols (LMS), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), ENAC-ICARE-LMS, Station 18, 1015 Lausanne

probabilité (occurrence rare, et donc inattendue, de la part du public et des autorités locales).

En effet, pour déterminer le comportement de ces zones instables, il convient de disposer d'une période de temps assez longue pour mettre en œuvre les investigations nécessaires, ce qui est rarement entrepris au cours des phases de mouvement régulier des versants en cause, alors que, lors d'une phase de crise, ce besoin de temps n'est pas compatible avec les mesures de prévention qui doivent être prises dans l'urgence, et donc pas toujours à bon escient.

Pour pallier à cette situation critique, il est donc indispensable de mettre en œuvre de façon appropriée les activités requises d'auscultation d'une part, de modélisation d'autre part, de manière à déterminer et à

quantifier les aléas, puis à les prendre en compte dans l'aménagement du territoire.

Afin d'évaluer la répartition et l'ampleur des zones de mouvement de pente sur le territoire suisse, il a été entrepris il y a de nombreuses années une interprétation systématique des 232 cartes topographiques au 1:25'000, afin de mettre en évidence les zones dont la morphologie d'ensemble est caractéristique de celle des grands glissements de terrain, comme celui de La Frasse (VD) qui sert de référence à l'illustration de cet article (les phénomènes affectant moins de 10 ha ne sont en général pas détectables par cette approche) (Noverraz et al. 1990). La synthèse de ces relevés conduit à une surface totale dépassant les 6% du territoire helvétique (figure 1). La confrontation de ce relevé avec des observations de terrain ou

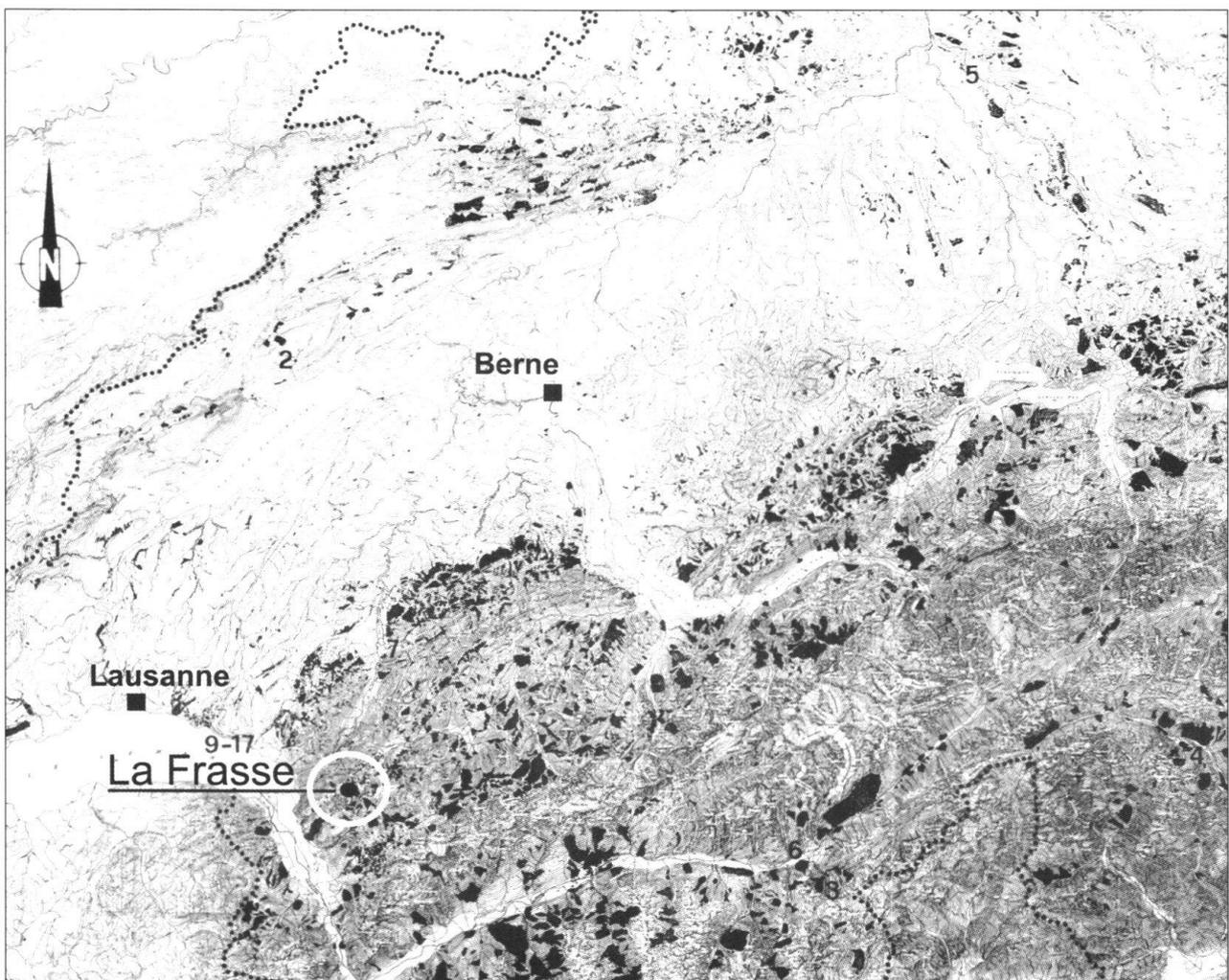


Fig. 1: Cartographie des grandes zones d'instabilité de pente dans l'Ouest de la Suisse (zones indiquées en noir) et localisation du glissement de La Frasse.

des données de déplacement démontre qu'il s'agit la plupart du temps de zones en mouvement permanent faible ou de zones stabilisées.

Néanmoins, lors d'événements climatiques exceptionnels ou à l'occasion de travaux d'infrastructures, ces zones sont souvent (mais pas toujours) exposées à des phases de réactivation, principalement du fait de la faible marge de sécurité que présentent ces pentes par rapport aux conditions d'équilibre limite. En particulier, pour les glissements actifs, dont le facteur de sécurité est théoriquement égal à 1, la mesure de ce facteur en cas de crise n'est pas adéquate pour qualifier l'ampleur attendue de la crise. Il faut donc poursuivre une approche allant au-delà de la simple identification, par l'intermédiaire d'une modélisation des mouvements au cours du temps, notamment lorsque les enjeux le justifient.

2. Identification des zones instables

Lors de l'investigation d'un grand versant instable où se manifestent des signes d'activité présents ou passés, il est nécessaire d'établir une première cartographie des limites du ou des glissements de terrain, sur la base d'indices géomorphologiques (DUTI 1985), mais aussi en tenant compte des conditions géologiques du versant. Ces limites ont trait non seulement au pourtour de la masse instable et du sommet de la niche d'arrachement, mais aussi au périmètre des zones d'activité différenciée (Noverraz et al. 1984). Cette différenciation peut s'établir sur la base d'indices de terrain, mais il est souvent difficile de déterminer avec précision l'ampleur des mouvements, car une crise dans le passé peut marquer durablement la morphologie de la pente, même si celle-ci est pratiquement stable pendant des années après la crise. Cet état de fait est confirmé par diverses tentatives informelles de levés comparatifs effectués indépendamment par plusieurs spécialistes et qui montre des résultats assez contrastés. Il est donc extrêmement utile de disposer de données géodésiques de déplacement à long terme, ou déri-

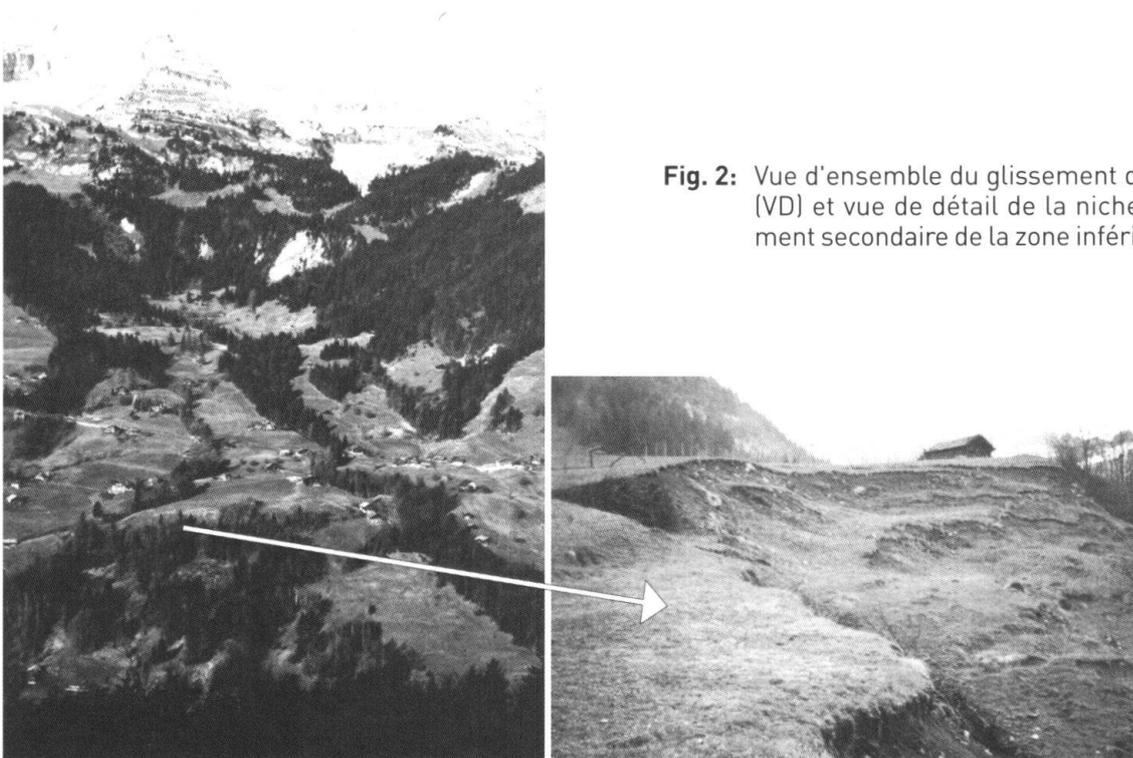


Fig. 2: Vue d'ensemble du glissement de La Frasse (VD) et vue de détail de la niche d'arrachement secondaire de la zone inférieure rapide.

vées de la comparaison de plans cadastraux, pour quantifier les vitesses moyennes des diverses zones.

Ces données, qui correspondent en général à des déplacements à long terme (> 50 ans) ou à moyen terme (mouvement sur une période comprise entre 10 et 50 ans) (Miszczak et al. 1982), sont très utiles pour établir la carte d'instabilité ou carte des phénomènes, selon la terminologie des recommandations fédérales (Lateltin 1997), sur la base de laquelle pourra être construite la carte des dangers (ou carte d'aléas). Cette carte des phénomènes permet aussi de planifier de façon appropriée le système d'auscultation à mettre en œuvre pour obtenir les données relatives aux phases d'accélération, que l'on peut en général attendre dans les zones où des vitesses moyennes supérieures à 10 cm/an sont évaluées et où des relevés morphologiques mettent en évidence des signes de crises passées, comme dans la partie inférieure du glissement de La Frasse (figure 2). Ce sont les mesures de ce système

de suivi en continu qui permettront alors de calibrer les épisodes de crises, lors de la phase de modélisation.

Dans le cas du glissement de La Frasse (VD) en dessus d'Aigle, la carte des phénomènes (figure 3) met en évidence trois zones principales, soit une zone supérieure (en jaune) où les vitesses moyennes à long terme varient entre 5 et 10 cm/an, une zone centrale (en orange) où la plage de vitesse s'étend entre 10 et 15 cm/an et une zone inférieure (en violet), subdivisée en trois sous-zones, où les vitesses peuvent aller de 15 à 60 cm/an (DUTI 1986).

Ces vitesses moyennes à long terme tiennent évidemment compte des divers épisodes de crise qui ont été rapportés dans le passé, soit 1910-1914, 1966, 1981-1982. Lors de la crise observée suivante, de 1993-94, les mouvements ont été suivis dans la partie basse du glissement, notamment le long de route cantonale conduisant au col des Mosses. Il convient de relever que les premiers relevés d'identification du glissement, effectués dès

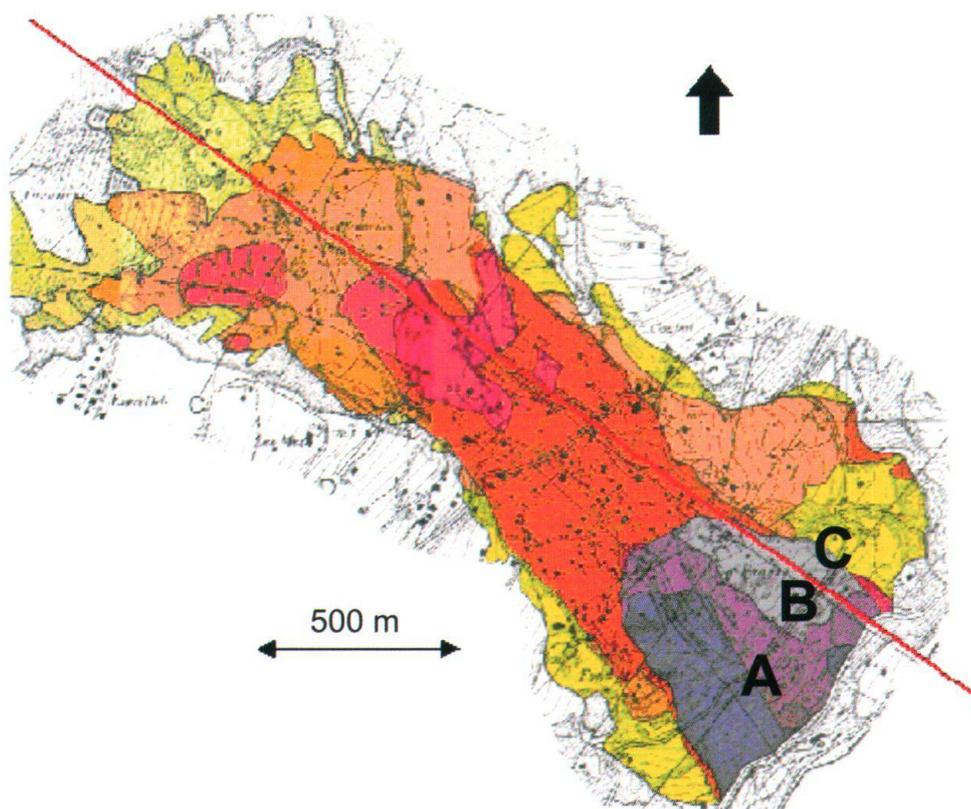


Fig. 3: Carte des phénomènes pour le glissement de La Frasse, intégrant les données d'auscultation à long terme. Les points A, B et C se réfèrent à la figure 5.

le début des années 1980 par le projet d'Ecole DUTI, ont été largement confirmés par les données d'auscultation recueillies ou établies par la suite dans le cadre de ce projet, alors que la vision des mouvements d'ensemble de ce glissement, élaborée précédemment, sans données quantifiées de mouvements, avait conduit à une interprétation cinématique inexacte (Bersier et al. 1970).

L'évaluation des vitesses moyennes des mouvements s'est appuyée dans le cas du glissement de la Frasse sur diverses approches qui permettent de chiffrer les mouvements dans le passé (Miserez et al. 1982), soit:

- l'utilisation de plans cadastraux anciens, remontant dans le cas particulier à 1768 et à 1861 pour la partie centrale du glisse-

ment, et respectivement 1838 et 1932, pour la partie haute (sur la Commune de Leysin);

- la comparaison de photographies aériennes, dont la plus ancienne sur le site de La Frasse remonte à 1957, et qui sont en général actualisées tous les six ans par l'Office Fédéral de Topographie (figure 4);
- l'exploitation des anciens travaux de mensuration, relatifs à des bornes délimitant les communes ou à proximité des routes cantonales, et dont les données les plus anciennes remontent ici à 1932 et 1951.

Ces différentes données, et notamment celles représentées à la figure 4 et établies par l'Institut de Photogrammétrie de l'EPFL, mettent en évidence la variation spatio-tempo-

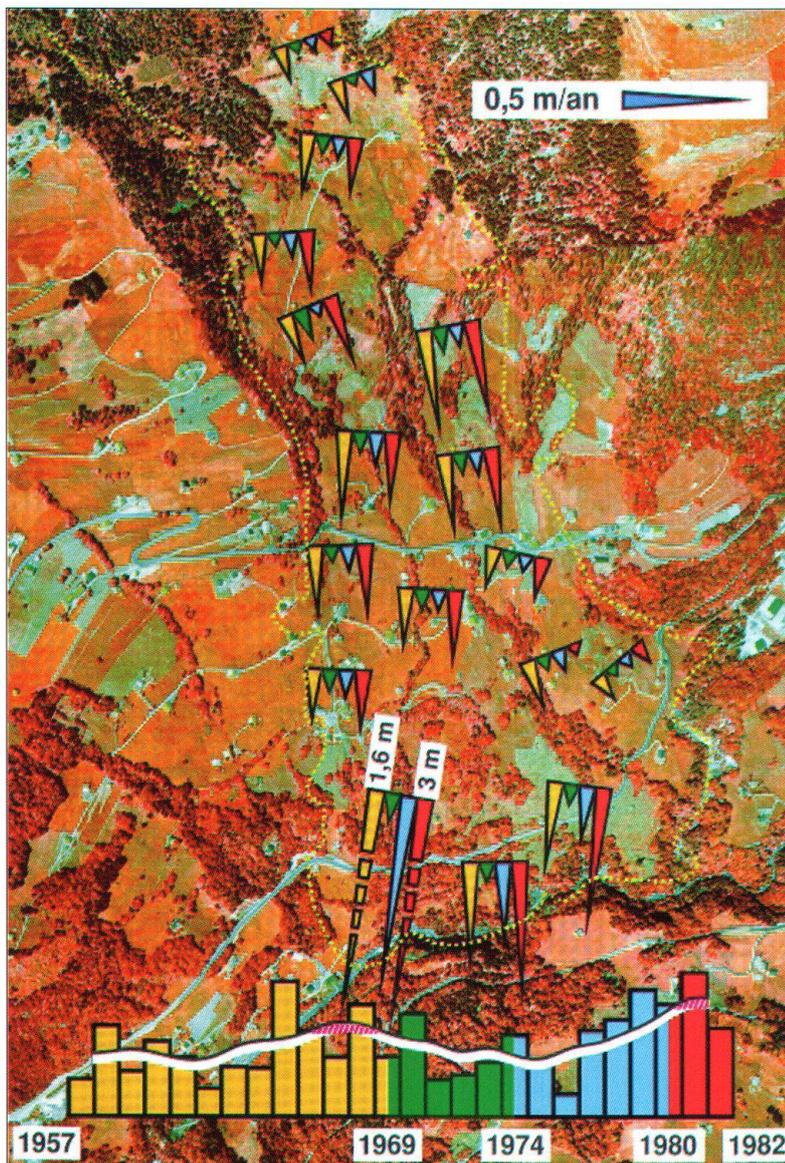


Fig. 4: Etablissement des mouvements horizontaux affectant le glissement de la Frasse au cours de quatre périodes (1957-69, 1969-74, 1974-80 et 1980-82) et mise en relation de ces périodes avec la pluviométrie annuelle sur ce site.

relle des vitesses de mouvements, qui s'observe en fait tant à une échelle de temps de quelques années que de quelques mois, comme cela a aussi été établi par des mesures serrées au cours des crises de 1981-82 et 1993-94 (figure 5). Il convient de relever à cet égard que la précision de l'analyse photogrammétrique est de l'ordre de 3 à 5 cm/an, lorsque des photos sont disponibles tous les six ans; elle peut éventuellement atteindre des valeurs plus basses si un espace de temps plus grand sépare deux clichés d'une même zone, mais il se présente le risque que des points caractéristiques soient moins facilement identifiables sur un couple de photos. Cette approche est donc inappropriée lorsque les mouvements des versants sont très faibles. Quant à la précision des mesures géodésiques, elle dépend de la qualité des travaux de relevé initiaux et peut varier entre quelques centimètres et quelques décimètres.

L'ensemble des données de déplacements, à long, moyen et court terme, permet donc tout d'abord de confirmer la pertinence de la carte des phénomènes, en quantifiant le degré d'activité des diverses parties du glissement. Cela peut aussi permettre de comprendre et de préciser les relations parfois complexes entre les périodes d'infiltration (de quotidienne à annuelle) importantes et

les variations de vitesse. En effet, au-delà des précipitations directes sur la pente, dont le rôle est en général cherché par de simples corrélations (voir graphique au bas de la figure 4), la réponse mécanique peut faire intervenir via l'encaissant du glissement et son effet capacitif, à la fois des infiltrations récentes et plus anciennes. Le comportement du glissement de La Frasse a ainsi été compris grâce aux données climatiques quotidiennes disponibles sur plusieurs décennies (Tacher et al. 2005). Enfin, les mesures à court terme permettent d'établir la variation des mouvements au cours des épisodes de crises, ce qui est essentiel pour la calibration des résultats de modélisation.

Les différences de comportement qui se manifestent grâce à ces mesures sont aussi utiles pour concevoir les systèmes d'assainissement les plus appropriés, car l'occurrence possible de périodes de crise peut par exemple conduire à développer un système agissant sur les causes (variation forte des pressions interstitielles), plutôt que sur les conséquences (blocage des mouvements en pied). L'auscultation s'avère donc à cet égard un investissement rentable.

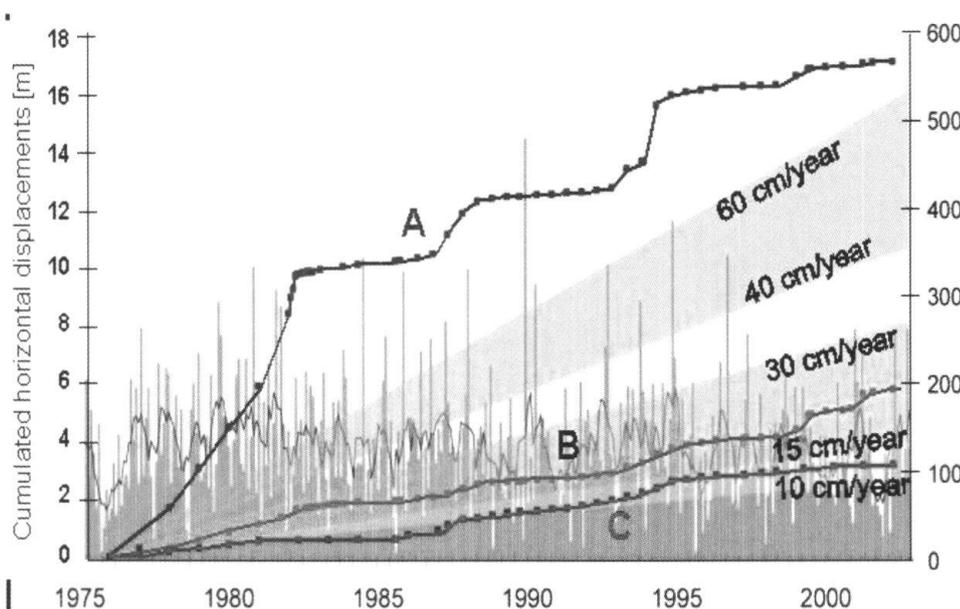


Fig. 5: Evolution des mouvements mesurés de 3 points A, B et C dans la partie inférieure du glissement de La Frasse, au cours d'une période de près de 30 ans, mettant en évidence pour le point A l'occurrence de périodes de crise répétées.

3. Prédiction des mouvements

Plusieurs approches directes ou indirectes peuvent fournir à une prédiction à court terme des mouvements d'un versant instable (de quelques jours à quelques semaines), notamment si l'on cherche à simuler le développement d'une phase de crise, conduisant à une rupture ou à une progression exponentielle des déplacements. Par exemple, les méthodes d'interprétation des données, d'une part, visant à suivre l'évolution de l'inverse des vitesses au cours du temps (Fukuzono 1990), appliquées par exemple aux cas de Randa comme de Falli Hölli (Bonnard et al. 1995), ou bien les méthodes de prédiction basées sur l'analyse de réseaux de neurones d'autre part (Vulliet 2001), appliquées au glissement de Sallèdes (Vulliet et al. 2000), semblent donner des résultats satisfaisants, mais pour autant que les conditions s'y prêtent. Dans le premier cas, le mécanisme de «pré-rupture» doit conduire jusqu'à l'accélération finale, sans que les conditions aux limites du modèle soient modifiées ou qu'un phénomène extérieur vienne perturber les conditions d'accélération précédant la rupture. Dans le second cas, relatif aux réseaux de neurones, les conditions provoquant l'accélération des mouvements ne doivent pas induire des changements trop brutaux qui ne pourraient alors pas être pris en compte, suite à l'effet de la fonction de filtrage propre à la méthode. Des tentatives d'application à la crise du glissement de la Chenaula (Engel et al. 1983) ont montré que la phase finale d'accélération, qui a conduit à des mouvements de 8 à 13 m en trois jours, ne peut être pronostiquée par de telles approches.

Dans le but de reconstituer de façon appropriée une phase de crise dans sa totalité, il est donc nécessaire de développer une modélisation des déplacements en régime transitoire, qui puisse tenir compte des variations rapides des champs de pression interstitielle dans tous les points de la masse glissée. Cette modélisation, qui peut être effectuée en 2D ou en 3D, implique trois étapes:

- un modèle géologique, intégrant toutes les données de forage et d'investigation in situ, afin de reconstituer en trois dimensions la géométrie des diverses formations concernées (6 formations dans le cas du glissement de La Frasse) et de leur associer les caractéristiques hydrogéologiques et géomécaniques appropriées, actualisées en fonction des phases de reconnaissance ultérieures.
- un modèle hydrogéologique, permettant la reconstitution des charges hydrauliques en chaque point pendant toute la phase de crise, en fonction des précipitations tombées au cours des périodes antérieures (pluie, neige) et de leur infiltration (après prise en compte des sorties du système par évapo-transpiration ou écoulement de surface). Les données de perméabilité et d'emmagasinement des diverses formations concernées jouent évidemment un grand rôle et doivent être calibrées, en fonction des observations disponibles (piézométrie, débit de sources, chimie des eaux). La figure 6, relative à la crise de 1993-1994 au glissement de La Frasse, met par exemple en évidence que les fluctuations de charge modélisées grâce à cet outil (modèle d'éléments finis FEFLOW®, mis en œuvre par le Laboratoire de Géologie de l'Environnement de l'EPFL) peuvent être peu marquées dans la partie supérieure du glissement (où se trouvent les sondages FR6 et LF1), alors que dans la partie basse, la plus active, les fluctuations de charge modélisées atteignent plus de 30 m au niveau du plan de glissement (au droit des sondages LF2 et LF9 par exemple). Ces valeurs serviront de données d'entrée pour la troisième phase de modélisation.
- un modèle géomécanique, qui traduit, dans un code d'éléments finis en 2D ou en 3D, l'effet des fluctuations de pression sur le comportement de la masse glissée, en tenant compte de diverses lois constitutives propres à chaque formation considérée (programmes Z-Soil ou GEFDYN®). Le

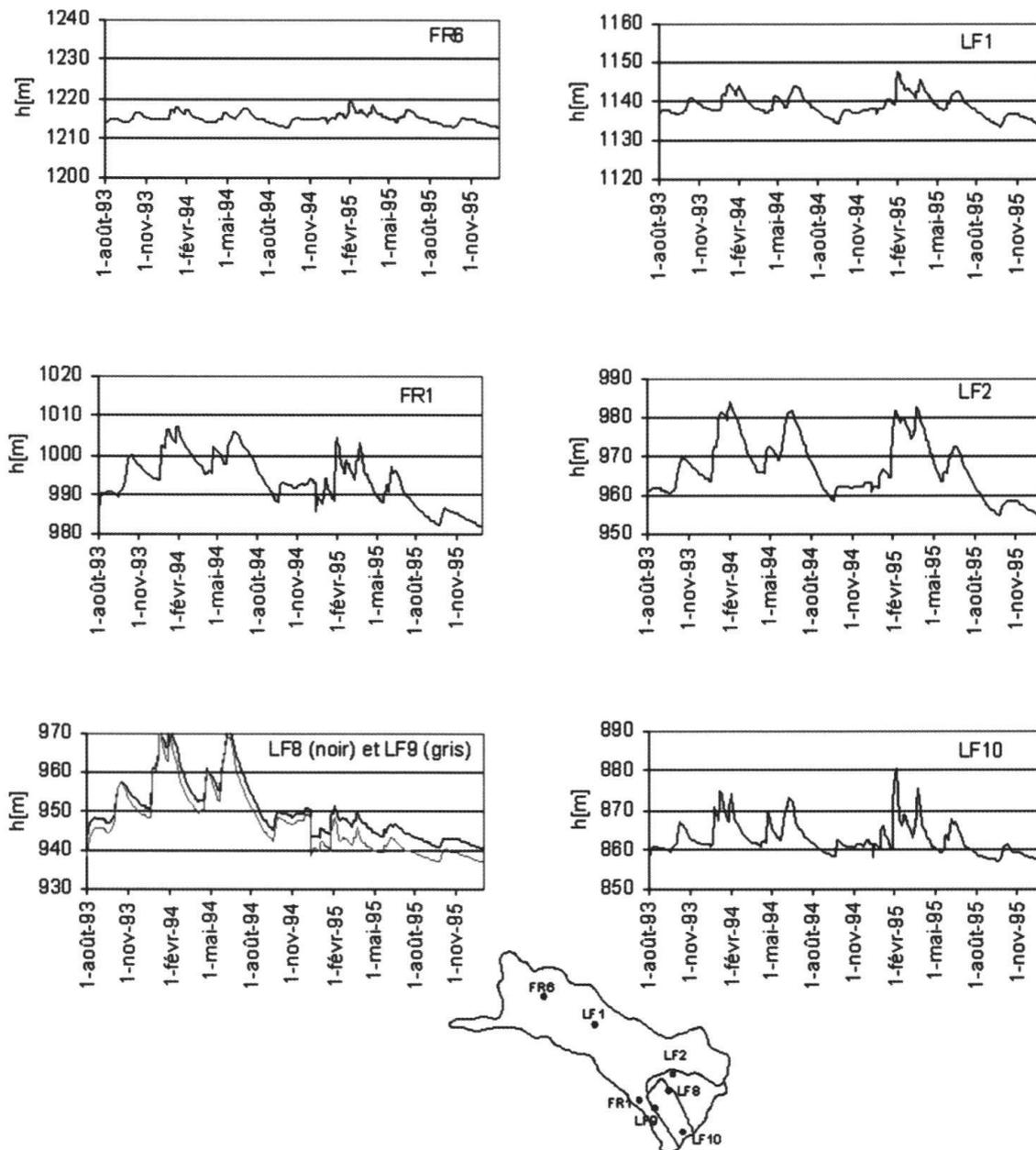


Fig. 6: Evolution des charges hydrauliques au glissement de La Frasse, au cours de la crise de 1993-94, en divers points du glissement.

choix des lois constitutives appropriées (Mohr-Coulomb, Cap, Hujoux) dépend d'une part des résultats des essais géomécaniques, d'autre part du rôle que joue chaque formation dans le développement du mouvement. Il est ainsi possible d'établir des champs de déplacement horizontaux et verticaux en chaque point du modèle, puis de comparer ces valeurs aux déplacements mesurés au cours de la crise, ce qui permet de calibrer divers paramètres dont l'établissement est difficile à

priori. Ces données peuvent être représentées comme un champ de déplacement correspondant à toute la crise (comme pour le cas du glissement de Triesenberg (Liechtenstein), représenté à la figure 7 - tiré de Tacher et al. 2007) ou comme l'évolution du déplacement horizontal d'un point au cours de la crise (comme pour le cas du glissement de La Frasse - représentée à la figure 8).

Les résultats de ces modélisations en chaîne sont significatifs, d'une part pour s'assurer

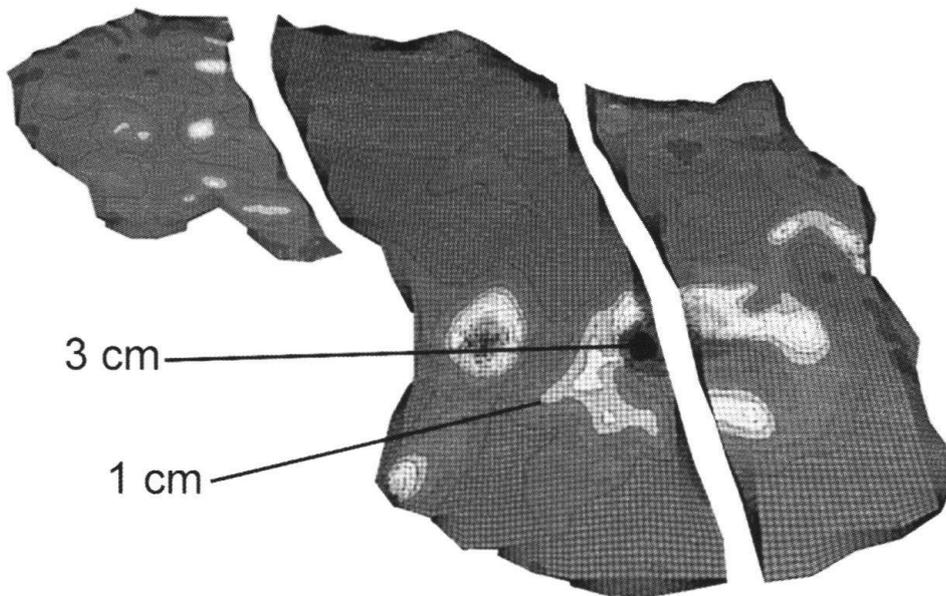


Fig. 7: Champ des déplacements correspondant à l'épisode de crise de l'an 2000 au glissement de Triesenberg, mettant en évidence dans une des trois parties de ce glissement un mouvement maximum de 3 cm.

de la cohérence des données et de la compréhension des mécanismes de mouvements et de leurs causes; d'autre part, ils permettent de simuler l'effet des mesures d'assainissement et d'en prouver l'efficacité. Dans le cas du glissement de La Frasse, les calculs des déplacements (voir figure 8) dans les zones les plus actives ont permis de prouver qu'avec un système de drainage, les déplacements correspondant à la crise de 1993-94 pourraient être réduits de près de 95% (Tacher et al. 2005). En dernier lieu, il est aussi possible d'introduire dans le modèle hydrogéologique les effets prévisibles des changements climatiques attendus, soit au niveau de l'importance des précipitations, soit au niveau des températures qui ont un effet sur l'évapotranspiration, de façon à appréhender dans quelle mesure les mouvements du glissement pourront être modifiés dans le futur (Tacher et al. 2007).

4. Validation des évaluations

Face aux résultats d'une telle modélisation des mouvements d'un glissement, qui analyse les mécanismes en jeu de façon approfondie, mais requiert une bonne connaissance des données de base et des conditions aux limites, le praticien peut à juste titre se poser

la question de la signification, de la précision et de la fiabilité des prédictions fournies. Il est clair que les modélisations entreprises ne fournissent pas des prédictions sûres à 100%, car nombre de données de base sont nécessairement entachées d'incertitudes, liées aux aspects suivants:

- Géométrie (dimensions du glissement et notamment profondeur des diverses couches en chaque point; données de déplacement mesurées servant à la calibration, surtout si les mesures initiales sont anciennes - voir paragraphe 2);

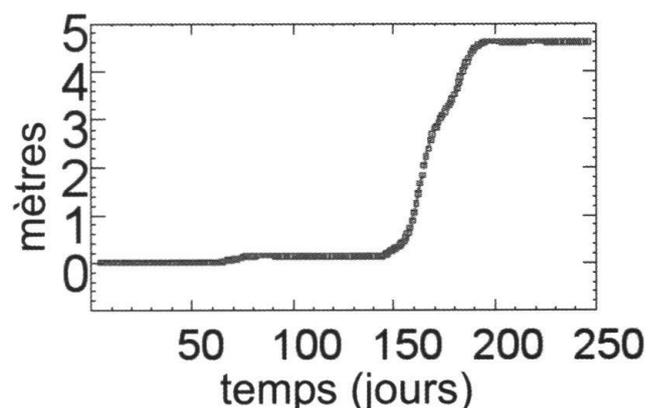


Fig. 8: Evolution du mouvement horizontal d'un point dans la partie inférieure du glissement de la Frasse, pendant la crise de 1993-94. Le déplacement réel mesuré au voisinage de ce point a atteint 3.2 m, au bord de la route cantonale, mais il est réduit par la présence d'une paroi de pieux soutenant la chaussée, qui n'est pas prise en compte dans le modèle.

- Conditions aux limites hydrogéologiques (imperméabilité du substratum; importance et distribution des apports le long du pourtour du glissement);
- Hétérogénéité et nature des précipitations (représentativité des stations de mesure disponibles; durée des observations; effet de la variation d'altitude en relation avec l'extension du glissement; quantité de précipitations sous forme de neige, et mode de fonte);
- Répartition des zones de perméabilité distinctes au sein de la masse glissée et paramètres relatifs à la non-saturation;
- Représentativité des échantillons utilisés pour les essais géotechniques et pertinence des lois constitutives appliquées.

De ce fait, selon les données considérées, les paramètres choisis et les scénarios envisagés, les calculs de modélisation peuvent conduire à des résultats assez différents, comme dans le cas illustré à la figure 9, où deux lois constitutives différentes, Mohr-Coulomb et Hujeux élastoplastique ont été prises en compte dans la modélisation du déplacement d'un point lors de la crise de 1993-1994 au glissement de la Frasse, les autres paramètres étant identiques (Laloui et al. 2004). Il est donc indispensable de procéder à divers calculs en faisant varier les hypothèses et de chercher à calibrer les résultats, tant dans le modèle hydrogéologique que géomécanique. Cette calibration n'implique pas que la valeur maximale des vitesses ou le déplacement total après la crise, mais aussi le point d'initiation de la phase d'accélération ou de la variation de charge hydraulique, la durée de l'épisode de crise, la vitesse de régression des mouvements ou des pressions après la phase paroxystique et le décalage du temps entre le pic d'un paramètre et son effet sur le mouvement.

Il est clair que la possibilité de quantifier les mouvements, dans des modèles reconstituant des crises passées ou lors de prédictions futures, dépend beaucoup de la disponibilité des données sur le site, et en particu-

lier des observations des mouvements passés lors des épisodes critiques. Le manque de données à cet égard peut souvent conduire à des estimations inappropriées et à des situations totalement inattendues en cas de phase catastrophique. Mais l'élément essentiel de la modélisation réside dans une bonne compréhension des mécanismes de mouvement et des facteurs qui déclenchent les crises (précipitations, érosion, apparition de fissures changeant les champs de perméabilité, effet d'un séisme), ainsi que des interactions entre ces facteurs.

Dans les Alpes, sur la base du recensement de nombreux mouvements catastrophiques (soit 96 cas sur 125 - Bonnard 1994), les précipitations s'avèrent être la cause principale des mouvements ayant conduit à un désastre ou à une situation de crise, comme dans le cas de Goldau en 1806. Mais il est indispensable de ne pas négliger la prise en compte d'autres facteurs qui peuvent contribuer à l'intensité des phénomènes en cause, ce qui n'est pas toujours facile dans les pays secs, et requiert une analyse multidisciplinaire, dans laquelle plusieurs scénarios doivent être analysés et comparés.

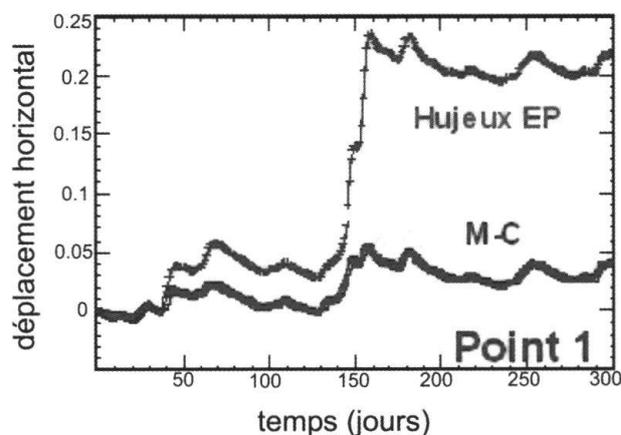


Fig. 9: Résultats de modélisation comparée des mouvements d'un point du glissement, selon la loi constitutive considérée dans le modèle géomécanique (M-C: Mohr-Coulomb).

4. Conclusions

Il faut rester conscient, face aux capacités de prédiction en plein développement des mouvements des grands phénomènes d'instabilité de pente, que cette approche, aussi sophistiquée soit-elle, reste une tâche difficile. Certes des progrès dans la prédiction ont été accomplis, grâce à l'utilisation des modèles couplés, conduisant même à estimer les effets possibles des changements climatiques. Cependant, le développement d'un épisode de crise simulé et de ses conséquences directes et indirectes, dans l'optique d'une quantification des dangers requise pour la cartographie des aléas, exige une formulation claire des risques résiduels, c'est-à-dire en relation avec les impacts indirects liés au mouvement de la masse instable et à ses conséquences secondaires (formation d'un barrage dans une vallée, puis rupture du barrage et inondation à l'aval, par exemple). L'impact des mouvements de crise sur les constructions constitue aussi un champ d'investigation à approfondir. La gestion des crises et des risques qui leur sont liées implique en conséquence une détermination tant des exigences de sécurité pour les objets exposés que de la performance des ouvrages d'assainissement, en prenant en compte des données économiques pertinentes, quelque soit le mode de gestion des dangers adopté (Bonnard et al. 2006).

Dans cette optique, une des mesures à prendre à court terme consiste à étendre l'application des dispositifs d'auscultation en continu, tant des masses instables que des ouvrages affectés, de façon à disposer de données suffisantes pour valider les modèles et pour accroître l'efficacité des mesures de prévention ou de protection qui seront mises en œuvre dans le futur.

En agissant assez tôt pour renforcer les actions de prévention, en se donnant le temps d'affiner les analyses des crises futures, on fera diminuer l'impact du développement inattendu des grands phénomènes d'instabilité de pente, ce qui conduira à une

réduction des dommages. Dans ce sens, la prévention, ainsi que la modélisation qui lui est associée, est généralement une démarche économiquement rentable.

Remerciements

Comme l'ensemble des recherches présentées ici résulte d'actions pluri-disciplinaires auxquelles de nombreux collègues de l'EPFL, comme des bureaux privés, ont participé, je me dois de remercier anonymement, mais chaleureusement, toutes les personnes concernées, qui ont permis, par leur engagement, d'approfondir non seulement un domaine de recherches, mais aussi de mettre en œuvre des solutions concrètes, puis de les faire connaître.

Références

- Bersier, A. & Weidmann, M. 1970: Le glissement de terrain de Cergnat - La Frasse (Ormont-Dessous, Vaud). *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.* 334. 70 p.
- Bonnard, Ch. 1994. Los deslizamientos de tierra: Fenómeno natural o fenómeno inducido por el hombre? *Proc. Ist Panam. Symp. on Landslides*, Guayaquil, August 1994. Vol. 2, pp. 1-15.
- Bonnard, Ch. & Vulliet, L. 2006: Management of risks from large landslides: the problems of acceptable and residual risks. *Proceeding RISK21 workshop*, Monte Verità, Switzerland, November 2004, pp. 191-201. Ed. Taylor & Francis, ISBN 0 451 40172 0.
- Bonnard, Ch., Noverraz, F., Lateltin, O. & Raetzo, H. 1995: Large landslides and possibilities of sudden reactivation. *Geomechanics Colloquy*, Salzburg. *Felsbau* No 6/95, pp. 401-407. Glückauf, Essen.
- DUTI 1985: *Projet d'Ecole DETECTION ET UTILISATION DES TERRAINS INSTABLES*, rapport final. Rapport général et rapports annexes. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. 229 p.
- DUTI. 1986. *Projet d'Ecole DETECTION ET UTILISATION DES TERRAINS INSTABLES*, rapport final sur le glissement de La Frasse et annexes. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Engel, T., Noverraz F. & Oboni, F. 1983: Glissement de La Chenaula. *Ingénieurs et Architectes Suisses*. No 22.
- Fukuzono, T. 1990: Recent studies on time prediction of slope failure. *Landslide News* No. 4. Ed. Kyoto University of Japan.
- Laloui, L., Tacher, L., Moreni, M. & Bonnard, Ch. 2004. Hydro-mechanical modeling of crises of large landslides: application to the La Frasse Landslide. *Proc. IX Int. Symp. on Landslides*, Rio de Janeiro, pp. 1103-1110. Ed. Balkema (2004), ISBN 04 1535 665 2.
- Lateltin, O. 1997: Recommandations fédérales pour la prise en compte des dangers de mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. *OFAT/OFEE/OFEG*. 32 p.
- Miserez, A., Gabus, J.H., Koelbl, O., Stuby, J.-J., Dupraz, H., Durussel, R. & Engel, T. 1982: Divers articles relatifs aux travaux de mensuration sur le glissement de La Frasse. *Revue Mensuration, Photogrammétrie, Génie Rural*. Novembre 1982.
- Noverraz, F. & Bonnard, Ch. 1984: Instability risk maps: from the detection to the administration of landslide-prone areas. *Proc. IVth Int. Symp. on Landslides*, Toronto. Vol. 2, 511-516.
- Noverraz, F. & Bonnard, Ch. 1990: Mapping methodology of landslides and rockfalls in Switzerland. *Proc. VIth Int. Conf. and Field Workshop on Landslides*, Università degli Studi, Milano, 43-53.
- Tacher, L. & Bonnard, Ch. 2007: Hydromechanical modelling of a large landslide considering climate change conditions. *Proc. Int. Conf. on Landslides and Climate Change*, Ventnor, Isle of Wight, UK (keynote lecture to be published).
- Tacher, L., Bonnard, Ch., Laloui, L. & Parriaux, A. 2005: Modelling the behaviour of a large landslide with respect to hydrogeological and geomechanical parameter heterogeneity. *Landslides*, Vol. 2 (2005). No 1, 3-14.
- Vulliet, L. 2001: Nouveautés dans l'analyse des mouvements de terrain. *Publ. Soc. Suisse de Méc. des Sols et des Roches*, No 143, 45-54.
- Vulliet, L. & Mayoraz, F. 2000: Coupling neural networks and mechanical models for a better landslide management. *Proc. of the VIIIth Int. Symp. on Landslides*, Cardiff, 1521-1528. Ed. Thomas Telford, London. ISBN 0 7277 2872 5.