

**Zeitschrift:** Tracés : bulletin technique de la Suisse romande

**Herausgeber:** Société suisse des ingénieurs et des architectes

**Band:** 136 (2010)

**Heft:** 15/16: Tunnel de Serrières

**Artikel:** Analyse et modélisation de glissements de terrain

**Autor:** Laloui, Lyesse / Eichenberger, John / Ferrari, Alessio

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-109687>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 18.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Analyse et modélisation de glissements de terrain

**Les glissements de terrain représentent une menace majeure pour la population, les bâtiments et les différentes infrastructures dans la plupart des régions montagneuses. En considérant les divers scénarios d'évolution climatique et les modifications des régimes de précipitation associés, il est fort probable que le comportement des glissements de terrain en soit affecté. Il faut en particulier s'attendre à ce que les glissements superficiels et les coulées de boue soient plus fréquents en réaction à des conditions météorologiques plus extrêmes [1]<sup>1</sup>.**

En Suisse, il n'y a pas de tendance générale à l'augmentation des précipitations totales. Par contre, on prévoit un plus grand nombre d'orages de plus forte intensité [2]. En altitude, certaines précipitations devraient tomber plus souvent sous forme de pluie que de neige. De plus, le changement climatique actuel s'accompagne d'une augmentation de la fonte des glaciers et du dégel du permafrost. Ceci accentue la probabilité d'occurrence de glissements peu profonds, de coulées de boue et de chutes de blocs dans des zones peu marquées par de tels événements dans le passé.

## Différents outils et approches de prédition

Le développement d'outils de modélisation et de prédition en matière de glissements de terrain est aujourd'hui guidé par les changements climatiques observés et les futurs scénarios élaborés pour les différentes régions du monde. Il est aussi soutenu par la nécessité de pallier aux effets destructeurs des mouvements de terrain. L'augmentation de l'impact des glissements de terrain, surtout observée dans les pays en voie de développement, est en grande partie liée à l'augmentation démographique, à la densité grandissante des infrastructures et aux diverses activités humaines dans les zones propices aux glissements de terrain. Au sein de la communauté scientifique pluridisciplinaire travaillant sur ces derniers, les géotechniciens visent à améliorer les connaissances sur le comportement des sols dans leurs contextes et à proposer des solutions minimisant l'impact économique

et social des mouvements de terrain (fig. 1). Les outils de simulation géotechnique prennent ainsi un rôle prépondérant dans l'évaluation des risques, pour autant qu'ils puissent reproduire les éléments clés des processus physiques impliqués. Les approches géo-mécaniques déterministes (éléments finis avec couplage hydromécanique) permettent une bonne approximation du traitement des problèmes d'initialisation des ruptures et des propagations des masses de pentes instables. Elles peuvent aider à raffiner l'expertise sur les instabilités superficielles pour des étendues régionales en complément aux simples courbes d'intensité-durée de pluie qui sont souvent utilisées pour définir des combinaisons de facteurs environnementaux critiques à la stabilité des pentes. D'autre part, elles pourraient à l'avenir être intégrées aux systèmes de prévention et d'alerte pour les grands glissements de terrain sujets à des accélérations de mouvements. Le potentiel des outils géo-mécaniques pour la quantification des risques liés aux instabilités de pente est actuellement examiné par 25 groupes de recherche européens, parmi lesquels le Laboratoire de Mécanique des Sols de l'EPFL, à travers le projet « SafeLand: Living with landslide risk in Europe », de la Commission Européenne<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

<sup>2</sup> <www.safeland-fp7.eu>

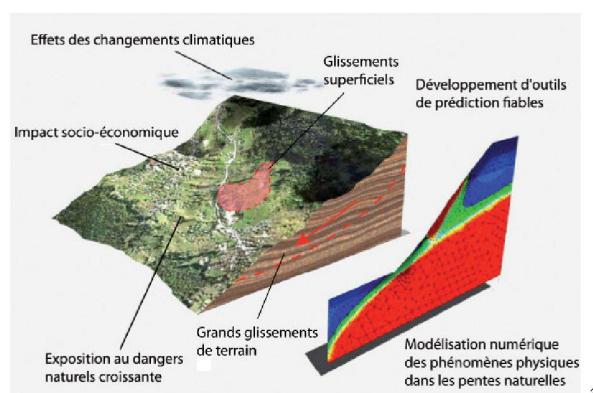
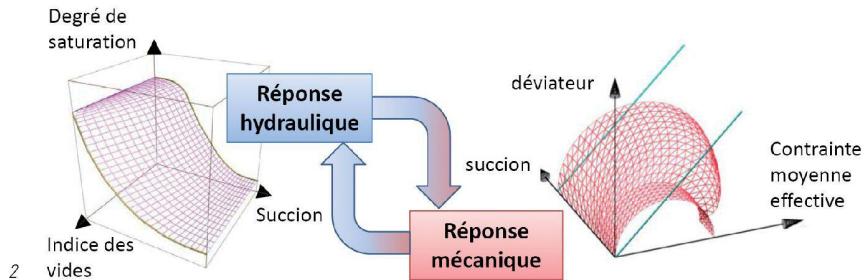


Fig. 1: Schéma et modélisation de zones propices aux glissements de terrain

Fig. 2: Concept du couplage hydromécanique. Modèle ACMEG de l'EPFL

Fig. 3: Procédure de modélisation : un maillage éléments finis est généré pour la zone d'intérêt. Les propriétés des matériaux, les conditions initiales et de bord sont définies. Pendant le calcul, l'évolution des variables d'état peut être suivie. Finalement, les variables de sortie sont exploitées, comme p.ex. les déformations de cisaillement.



Les outils de mesure des déplacements en surface et en profondeur, ainsi que du régime hydraulique ont connu un développement rapide cette dernière décennie. Des systèmes automatisés sont aujourd'hui disponibles en grand nombre et à des prix abordables sur le marché (par exemple la surveillance à distance et acquisition automatique de données par laser, l'extensomètres ou le GPS). Les modèles géo-mécaniques et statistiques notamment les réseaux de neurones artificiels pour la prédition des mouvements de terrain peuvent ainsi profiter d'un plus grand nombre de données d'entrée en temps réel. Dans cette perspective, nous travaillons actuellement sur le développement de modèles mixtes issus de la combinaison de calculs géo-mécaniques et de mesures in-situ en temps réel. Des développements de tels modèles mixtes entre surveillance et prédition se font aussi en génie civil pour les structures existantes (mot-clé « health management systems »).

### Connaissance du comportement des sols dans différents environnements

De nombreuses observations et analyses du déclenchement de glissements superficiels suite à des évènements pluvieux existent. Les courbes avec seuil critique d'intensité-durée de pluie ont été proposées dans les années 80 comme méthode de prédition de ces glissements de terrain. Cette approche statistique présente néanmoins une applicabilité limitée du fait que le nombre d'évènements enregistrés est généralement très petit, les caractéristiques des sols ne sont pas constantes au niveau régional pour lequel les courbes sont évaluées et les changements climatiques et d'occupation du territoire peuvent sensiblement modifier la susceptibilité aux glissements de terrain.

D'une manière générale, il existe deux régimes de flux dans les pentes naturelles. Le premier est un flux profond, la plupart du temps parallèle à la surface de la pente, qui peut avoir des interactions complexes avec le substratum rocheux. Le deuxième est superficiel avec des pressions d'eau positives ou des succions capillaires qui dépendent de l'eau de pluie qui s'infiltra principalement de façon verticale par la surface. Les conditions hydrogéologiques préalables à un évènement pluvieux majeur ainsi que l'infiltration des pluies influencent l'apparition et le type de mécanismes déclenchant les mouvements de terrain. La nature des mouvements, parfois lents et rigides, parfois rapides et plutôt fluide, dépend d'une multitude de facteurs dont l'intensité des précipitations et leur durée, la capacité de dissipation des pressions d'eau du sol, les conditions météorologiques antérieures, l'hétérogénéité des couches de sol sur le site, l'inclinaison de la pente, la composition granulométrique ainsi que la densité et l'état de contrainte du sol avant l'évènement pluvieux principal. Un flux parallèle à la surface de la pente peut s'installer dans la partie supérieure d'un sol partiellement saturé lorsque le volume d'eau infiltré est assez considérable. Dans ce cas, un important volume d'eau est transporté vers le pied du glissement. Plusieurs processus hydromécaniques peuvent

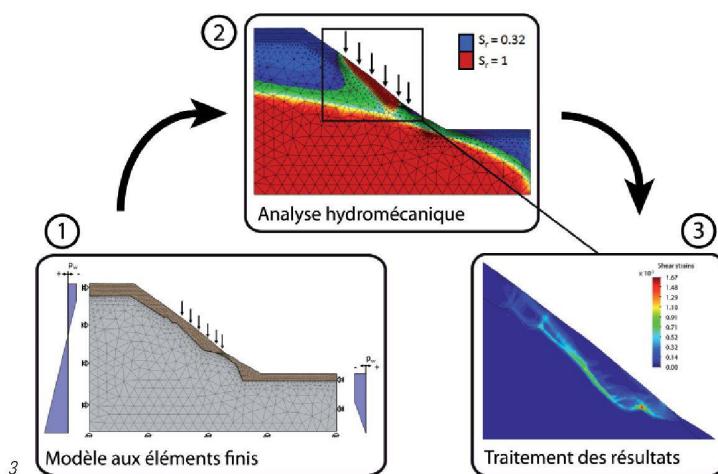


Fig. 4 : Exemple d'installation au laboratoire pour les essais dans des conditions partiellement saturées : (a) vue sur le dispositif expérimental pour l'application de la technique de translation d'axe dans les cellules triaxiales ; (b) bain de sorption pour la détermination de la courbe de rétention dans une large gamme de suctions

avoir une influence déstabilisante sur la pente. Le degré de saturation de la partie supérieure du sol augmente, réduisant la tension capillaire entre les particules de sol, ce qui affaiblit la pente. Puis, en réaction à l'écoulement d'eau à l'intérieur de la matrice solide, le fluide exerce des forces de percolation vers l'aval. Si l'intensité des précipitations est supérieure à la capacité du sol à dissiper l'eau interstitielle, un ruissellement de surface peut survenir, ce qui risque d'éroder la pente. Différentes combinaisons de facteurs peuvent favoriser l'un ou l'autre type d'instabilité, dont les glissements en bloc superficiels à faible vitesse et petite distance de parcours, des ruptures dites diffuses en conditions non-drainées menant à des coulées de boue qui peuvent développer des vitesses importantes et parcourir des grandes distances ou encore des ruptures généralisées à plus grande profondeur en liaison avec des variations du niveau de la nappe phréatique. Les modèles géo-mécaniques permettent notamment d'élaborer l'importance relative des différents facteurs pour des conditions géologiques et climatiques particulières. Cependant, ce n'est qu'à travers une analyse multiphysique et l'élaboration de modèles constitutifs avancés que les processus physiques décrits auparavant peuvent être considérés dans l'analyse.

Pour plusieurs glissements de terrain superficiels, l'expérience a montré que l'état de saturation du sol est un élément clé. L'augmentation du degré de saturation, ainsi que la réduction de la succion pendant l'infiltration, dépendent des propriétés de rétention du sol. Parallèlement, le degré de saturation détermine la perméabilité du sol, qui affecte à son tour le flux hydraulique. De plus, la succion a une influence sur la réponse mécanique du sol, en termes de résistance au cisaillement et de variation de volume. La variation de porosité peut à son tour provoquer des changements de perméabilité hydraulique et des propriétés de rétention. Par conséquent, les modèles géo-mécaniques prennent en compte deux composantes : une pour le comportement mécanique du matériau et une autre pour le comportement hydraulique dans des conditions saturées et partiellement saturées (fig. 2).

Pour introduire de manière réaliste les phénomènes mécaniques et hydrauliques liés à la succion (variations volumiques, rigidité, capacité de rétention et de résistance au cisaillement), il est d'usage d'introduire le concept de contrainte effective généralisée :

$$\sigma' = \sigma + S_{rs}$$

où  $\sigma'$  et  $\sigma$  sont respectivement les contraintes effective et externe,  $S_r$  le degré de saturation variant de 0 à 1 et  $s$  la succion (pression capillaire). Dans ce contexte, le comportement mécanique est donc intrinsèquement lié au comportement

hydraulique par la succion et le degré de saturation. Sur le plan constitutif, la relation contrainte-déformation peut être liée à la courbe de rétention pour reproduire des phénomènes couplés particuliers, comme par exemple, l'effondrement du squelette solide lors du mouillage d'un sol initialement dans un état de saturation partielle.

### Modélisation du déclenchement de glissements de terrain

Dans une optique de simulation numérique, des modèles constitutifs couplés hydromécaniques sont communément intégrés dans des codes aux éléments finis (fig. 3). L'effet de l'infiltration d'eau de pluie peut être simulé dans une analyse transitoire. Contraintes et déformations à l'intérieur de la matrice solide déformable, pressions interstitielles et écoulements d'eau sont calculés simultanément. Contrairement aux méthodes classiques d'équilibre limite, les analyses aux éléments finis permettent de mettre en évidence les déformations progressives qui apparaissent au fur et à mesure que l'eau s'infiltre dans le sol. Dans le cadre de la théorie de l'état critique, les modèles constitutifs de pointe permettent d'affiner l'analyse de la déformation. Les variations de volume dues au mouillage (gonflement ou compaction du sol) peuvent être spatialement et temporellement dissociées des déformations dues au cisaillement. A l'aide de l'analyse des chemins de contrainte de différents points dans la masse instable, la déformation détaillée permet de tirer des conclusions intéressantes sur le type de mécanisme de rupture et

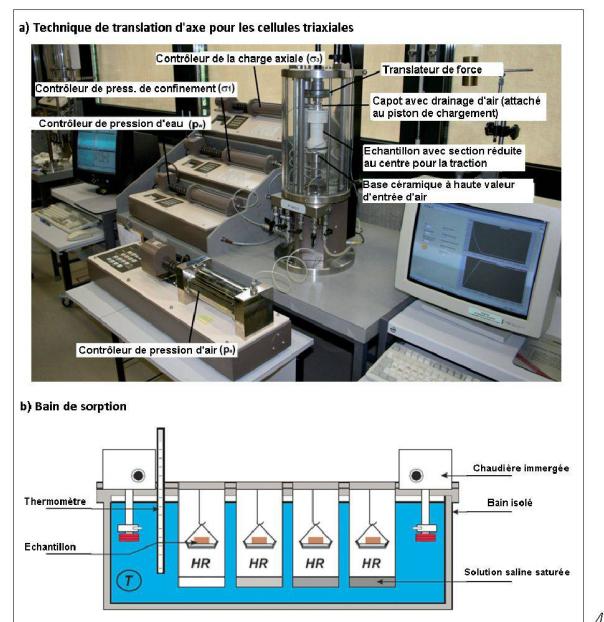


Fig. 5: Outil couplé déterministe-statistique pour la prédition du comportement de grands glissements de terrain. L'entraînement du réseau de neurones artificiel (RNA) est enrichi avec des données provenant de simulations numériques pour des conditions climatiques extrêmes. Thèse de doctorat de J. Eichenberger

(Tous les documents illustrant cet article ont été fournis par les auteurs.)

dans une certaine mesure sur le comportement de la masse instable après rupture (p.ex. glissement rigide en blocs ou coulée de boue) [3].

Pour la considération des aspects hydromécaniques en conditions de saturation partielle du sol, des analyses supplémentaires en laboratoire sont nécessaires pour la détermination des paramètres du matériau. Celles-ci peuvent se faire dans un test à succion contrôlée (fig. 4). Des efforts considérables ont été mis en œuvre ces dernières décennies pour développer des outils capables de contrôler la succion de manière adéquate et d'évaluer les variations de volume de l'échantillon de sol pendant les essais. La principale difficulté est associée à l'impossibilité de contrôler directement une pression négative dans les pores dans la fourchette d'intérêt pratique qui peut s'étendre à plusieurs MPa pour certaines applications. Il existe actuellement plusieurs techniques pour évaluer le degré de saturation. Elles diffèrent principalement par la manière de contrôler le potentiel capillaire (translation d'axe, équilibre de vapeur, composants osmotiques).

### Perspectives pour le développement des outils de prédition numériques

A l'échelle régionale ou à l'échelle d'une pente, des modèles phénoménologiques ou semi-physiques sont utilisés dans la pratique. Certains incluent directement les données enregistrées en permanence pour prédire, par extrapolation, le moment de rupture ou d'augmentation de vitesse. Un inconvénient majeur de ces modèles est qu'ils se basent sur les variations de vitesse en surface et sur des conditions aux limites constantes pour prédire une rupture. D'autres méthodes sont plus adaptées, comme par exemple celles contenant des

algorithmes d'auto-régression (p.ex. réseaux de neurones artificiels). Ces derniers ont prouvé leur efficacité dans les estimations des déplacements pour les grands glissements lents.

Le réseau de neurones artificiel est un outil de modélisation statistique inspiré du fonctionnement des neurones biologiques. L'idée générale est que le réseau de neurones artificiel apprend à tirer, par observation limitée, des généralisations plausibles. En d'autres termes, le réseau trouve à la fin d'un programme d'apprentissage une dépendance entre des données d'entrée et de sortie et il peut être ensuite utilisé pour prédire des valeurs de sortie pour une nouvelle série de données d'entrée. Dans le cas des glissements de terrain, il peut être entraîné à l'aide de séries de données temporelles d'entrée et de sortie (p.ex. en entrée l'histogramme des pluies et en sortie les déplacements mesurés).

Les prédictions des réseaux de neurones artificiels sont adéquates pour autant que les valeurs des données d'entrée se trouvent dans la fourchette des valeurs des données d'entrée utilisées pour l'entraînement. Un modèle géo-mécanique déterministe pourrait être utilisé pour produire une série de données simulées qui tient compte des variations climatiques extrêmes attendues pour l'avenir afin d'améliorer l'entraînement des réseaux de neurones (fig. 5). Le réseau de neurones optimisé par les deux phases d'entraînement pourra ensuite être utilisé comme outil indépendant, rapide et idéal pour les prédictions en temps réel.

### Outils de prédition renforcés

Avec les récents progrès en matière de modélisation numérique du comportement des sols, il est aujourd'hui possible d'évaluer les effets éventuels des différents scénarios de changement climatique sur la stabilité des pentes. La compréhension des mécanismes clés dans le déclenchement et la propagation des glissements de terrain combinée avec des mesures précises et en temps réel vont assurément aider à renforcer la fiabilité des outils de prédition dans le futur.

Yesse Laloui, prof., dr Mécanique des sols  
John Eichenberger, ing. civil EPF

Alessio Ferrari, dr Mécanique des sols

Laboratoire de Mécanique des sols

Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Station 18, CH – 1015 Ecublens

### Références :

- [1] OcCC/ProClim, *Klimaänderungen und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft*, Berne, 2007
- [2] BAFU, *Klimaänderung in der Schweiz: Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen*, Berne, 2007, p. 1-77
- [3] EICHENBERGER J., NUTH M., LALOUI L., « Modeling landslides in partially saturated slopes subjected to rainfall infiltration », chapter of the book *Mechanics of unsaturated geomaterials*, Eds. L. Laloui, John Wiley & Sons, 2010, pp. 235-250

