

22. Analyses géo-mécaniques des glissements de terrain superficiels

par

John EICHENBERGER¹, Alessio FERRARI¹ & Lyesse LALOU¹

Résumé.—EICHENBERGER J., FERRARI A. & LALOU L., 2013. Analyses géo-mécaniques des glissements de terrain superficiels. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 279-293. Deux études géo-mécaniques d'instabilités de versant superficielles induites par des précipitations sont présentées dans cet article. La première étude porte sur l'analyse numérique du comportement d'un terrain en pente soumis à l'infiltration d'eau de pluie avant sa rupture. Dans le cadre de la théorie de l'état critique, un modèle constitutif adapté aux sols à saturation en eau variable est utilisée pour une analyse détaillée des déformations. Les variations de volume dues au mouillage sont spatialement et temporellement dissociées des déformations dues au cisaillement. A l'aide du suivi des chemins de contrainte et des déformations de différents points dans la masse instable, le développement du mécanisme de rupture peut être analysé. Des conclusions qualitatives sont tirées sur le comportement probable de la masse instable après rupture. La deuxième étude porte sur l'établissement de seuils critiques d'intensité et durée de pluie pour la stabilité de pente à partir de séries de simulations numériques 2D. Le modèle géo-mécanique intègre le flux dans les sols partiellement saturés et les effets de la succion capillaire sur la résistance mécanique. A la suite et en fonction des propriétés hydrauliques du sol et des conditions hydrologiques antérieures aux événements pluvieux majeurs, différents mécanismes de rupture peuvent être associés aux événements pluvieux.

Mots clés: Glissements de terrain, modélisation numérique, éléments finis, prédiction.

Abstract.—EICHENBERGER J., FERRARIA A. & LALOU L., 2013. Geomechanical analysis of shallow landslides. *Mémoire de la Société vaudoise des Sciences naturelles* 25: 279-293. Two geomechanical studies on rainfall induced shallow landslides are presented in this paper. The first study focuses on the analysis of the onset of failure of a rainfall-induced landslide by means of a numerical finite element simulation. In the framework of the critical state concept a constitutive model particularly suited for the analysis of partially saturated soils is used for a detailed stress-strain analysis. Wetting induced volumetric strains are spatially and temporally dissociated from strains induced by shearing. By following up the stress and strain paths at different locations within the instable soil slope, the development of the failure mechanism can be analysed in its details. Qualitative conclusions are drawn

¹Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit (ENAC), Laboratoire de mécanique des sols (LMS), EPFL-ENAC-LMS, Station 18, CH-1015 Lausanne, Switzerland; tél.: +41 (0)21 693 53 98.
E-mail: john.eichenberger@epfl.ch

for the landslide behaviour in the post-failure stage. The second study deals with the establishment of threshold values of rainfall intensity and duration for the triggering of shallow landslides in Alpine regions from numerical 2D finite element simulations. The geomechanical model considers the water flow in partially saturated soils and capillary effects on shear strength. Depending on hydraulic soil properties and antecedent rainfall conditions, different failure mechanisms are associated to major rainfall events.

Keywords: Landslides, numerical modelling, finite elements, prediction.

DÉFIS EN MATIÈRE DE PRÉDICTION DU COMPORTEMENT DE VERSANTS POTENTIELLEMENT INSTABLES

Les glissements de terrain représentent une menace majeure pour la population, les bâtiments et les différentes infrastructures dans la plupart des régions montagneuses. En vue de conditions météorologiques plus extrêmes prévues pour l'avenir, il faut en particulier s'attendre à ce que les glissements superficiels et les coulées de boue soient plus fréquents (OCCC/PROCLIM 2007, BAFU 2007). 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.

Les modèles géo-mécaniques sont des outils pratiques pour l'évaluation de la stabilité de versant potentiellement instables, mais aussi pour la prédiction de leur comportement futur pour différents scénarios climatiques (LALOU *et al.* 2010). Leur développement est nécessaire afin de pallier aux effets destructeurs des mouvements de terrain. Ces outils de modélisation numérique occupent de plus en plus souvent une partie essentielle dans les expertises géotechniques et peuvent notamment aider à une meilleure compréhension des processus physiques et du comportement des sols dans un problème donné ; et ceci pour autant qu'ils puissent reproduire les éléments clés des processus physiques impliqués. Les défis de l'analyse géo-mécanique des glissements de terrain proviennent de l'expertise propre exigée en matière de modélisation, mais encore plus du fait que la modélisation géo-mécanique s'inscrit dans un processus interdisciplinaire comportant plusieurs étapes impliquant à la fois des modèles géologiques, hydrologiques et géo-mécaniques (figure 1).

Les approches géo-mécaniques déterministes (éléments finis avec couplage hydromécanique) permettent une bonne approximation du traitement des problèmes d'initiation de ruptures dans un versant. Ils aident notamment à répondre à certaines questions liées au danger de glissements de terrain:

1. Emplacement, volume de la masse instable et fréquence des glissements de terrain?
2. Prédiposition d'une pente à la rupture pour certaines conditions environnementales?
3. Mesure quantitative de la stabilité de versant?
4. Prédiction temporelle du déclenchement?
5. Type de glissement?
6. Type de comportement après rupture?

Un modèle spécifique ne peut répondre à lui seul à toutes les questions ci-dessus. L'application des modèles déterministes avancés aux éléments finis est généralement limitée à l'échelle d'un versant pour lequel les conditions hydrogéologiques sont connues

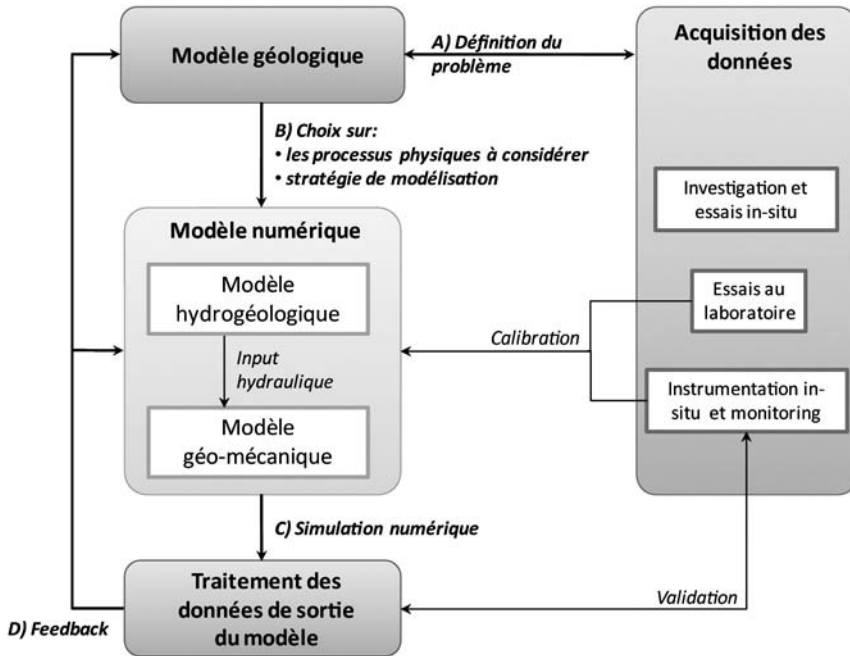


Figure 1.–Processus itératif et interdisciplinaire de la modélisation des glissements de terrain.
Iterative and interdisciplinary process of landslide modelling.

et suffisamment de données d'entrée sont disponibles pour leur calibration. Néanmoins, les résultats peuvent être appliqués à des échelles supérieures si les conditions géologiques et les sols considérés sont représentatifs. En plus, dans le cas des glissements superficiels, les analyses géomécaniques unidimensionnelles (p.ex. analyse aux éléments finis d'infiltration verticale d'eau de pluie suivie d'un calcul de facteur de sécurité basé sur l'hypothèse de la pente infinie) peuvent être applicables à grande échelle également (GODT *et al.* 2008, APIP *et al.* 2010).

Deux études numériques sur des instabilités de pentes superficielles dans des sols à saturation en eau variable sont présentées dans cet article exposant les capacités des modèles hydro-mécaniques de complexité variable à donner des réponses aux questions listées ci-dessus.

PROCESSUS PHYSIQUES DANS LES VERSANTS SOUMIS AUX PRÉCIPITATIONS

D'une manière générale, il existe deux types de régimes d'écoulement souterrain dans les versants naturels. 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 positive ou des suctions capillaires qui

dépendent de l'eau de pluie qui s'infiltré principalement de façon verticale par la surface (LU & LIKOS 2004).

Les conditions hydrogéologiques préalables à un évènement pluvieux majeur ainsi que l'infiltration des pluies influencent l'apparition et le type de mécanismes qui déclenche 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, le type de sol, sa granulométrie ainsi que sa densité et son état de contrainte avant le principal évènement pluvieux.

Un écoulement parallèle à la surface de la pente peut s'installer après un évènement pluvieux lorsque le front de saturation atteint un substratum relativement imperméable. Dans ce cas, un volume considérable d'eau est transporté vers le pied du glissement.

Plusieurs processus hydromécaniques peuvent avoir une influence déstabilisante sur un versant. Le degré de saturation de la partie supérieure du sol augmente, réduisant la tension capillaire entre les particules de sol, ce qui affaiblit le sol qui constitue un versant. 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 le versant. 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 de 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'au travers d'une analyse multi-physique 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. Bien que des glissements de terrains sous l'action des variations de pressions interstitielles positives (en compression) soient bien documentés dans la littérature et probablement les plus récurrents (JOHNSON & SITAR 1990, MONTGOMERY *et al.* 2009), ils peuvent également se passer en conditions de saturation en eau partielle. Tel est le cas pour les versants à forte pente présentant un substratum qui n'est pas particulièrement moins perméable que la couverture de sol et pour lesquelles la contribution des forces capillaires à la stabilité est substantielle (GODT *et al.* 2009). Dans ce dernier cas, l'eau qui s'infiltré dans le sol induit une augmentation progressive du degré de saturation de la surface en profondeur sans pour autant que le substratum favorise la formation d'une zone saturée en eau à pressions positives. Par conséquent la succion peut être réduite à un niveau critique pour la stabilité du versant.

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 (figure 2).

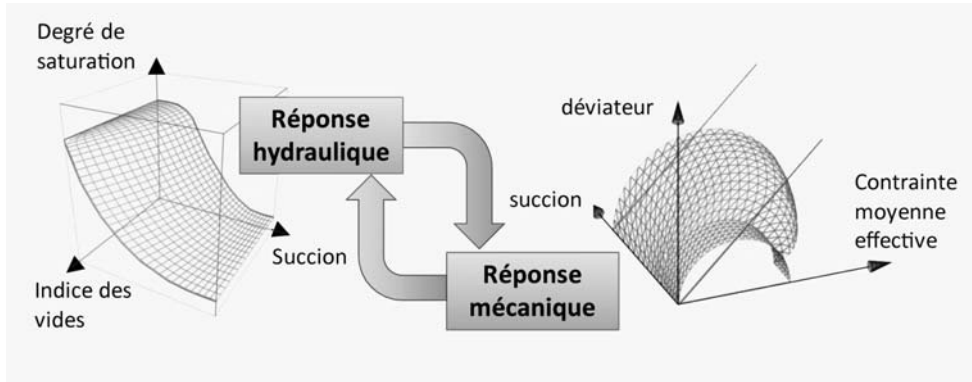


Figure 2.—Concept du couplage hydromécanique – Modèle ACMEG de l’EPFL. Un modèle de rétention d’eau permet de décrire l’évolution de la succion en fonction du degré de saturation en eau dans le sol (gauche). L’influence de la succion sur le comportement mécanique du sol (notamment une résistance au cisaillement plus élevée) est considérée entre autre au niveau de la loi constitutif par le biais d’une surface de charge qui évolue avec la succion (droite).

Concept of hydromechanical coupling – ACMEG model of EPFL. The water retention model allows describing the evolution of matric suction as a function of the degree of saturation (left). The influence of matric suction on the mechanical behaviour of a soil (in particular the increased shear strength) is considered from a constitutive point of view by means of a suction-dependent plastic yield surface (right).

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:

$$\sigma' = \sigma + S_r s \quad (\text{Equation 1})$$

où σ' et σ 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 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.

Dans une optique de simulation numérique, des modèles constitutifs couplés hydromécaniques sont communément intégrés dans des codes aux éléments finis. 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'infiltré dans le sol.

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU DÉCLENCHEMENT DE GLISSEMENTS DE TERRAINS SUPERFICIELS DUS AUX PRÉCIPITATIONS

Dans le cadre du projet TRAMM du CCES (Swiss Competence Center Environment and Sustainability) un essai en vraie grandeur a été entrepris à Rüdlingen, dans le nord-est de la Suisse. Un glissement de terrain superficiel d'environ 130 m² a été déclenché artificiellement par application continue d'eau sur la surface de la pente fortement instrumentée (SPRINGMAN *et al.* 2009). Les données géométriques du site (Askarnejad 2009), ainsi que les caractéristiques du sol (EICHENBERGER *et al.* 2010a) ont été utilisées pour créer le modèle d'éléments finis représenté dans la figure 3.

Le comportement du sol partiellement saturé reposant sur un substratum fissuré a été modélisé avec la loi constitutive élasto-plastique ACMEG-s (NUTH & LALOU 2007). Le modèle hydro-mécanique est complété avec un modèle de rétention d'eau décrivant l'évolution de la succion matricielle avec le degré de saturation en eau du sol (NUTH & LALOU 2008). Une analyse hydro-mécanique transitoire a été faite par le biais du logiciel FEM LAGAMINE (CHARLIER 1987, COLLIN 2003) et les variations temporelles des variables hydrauliques, des contraintes et des déformations pendant l'infiltration d'eau de pluie ont été tracées. L'analyse a également permis de déterminer le mécanisme de rupture le plus probable.

Une infiltration d'eau de 15 mm/h pendant 3.5 jours a été simulée dans le modèle de versant aux éléments finis qui contient tous les couplages hydromécaniques décrites auparavant. La figure 4 montre les contours du degré de saturation en eau du sol ainsi que les déformations déviateurs pour la zone d'intérêt. Les zones foncées dans la figure de gauche indiquent que le sol a été quasiment saturé durant la période de temps de simulation. En même temps, les zones claires de la figure de droite indiquent qu'un mécanisme de rupture s'est produit. Les contraintes de cisaillement sont principalement localisées le long de l'interface entre le substratum rocheux et la couche de sol superposée. On peut constater que la zone de cisaillement se confond avec la zone affectée par l'infiltration d'eau.

Afin d'analyser l'évolution des mécanismes plastiques dans le versant au cours de l'infiltration d'eau, les trois points indiqués sur la figure 4 ont été choisie pour l'observation. D'une part, l'activité du mécanisme plastique déviateur est observée par le biais des déformations déviateurs (figure 5a). D'autre part, les changements de volume dus au mouillage (gonflement ou compaction du sol) sont tracés afin de tirer des conclusions sur le risque d'effondrement de la structure du sol pendant un évènement pluvieux (figure 5b).

Comparé aux autres points d'observation, le comportement volumique du sol au point A dans la partie inférieure du glissement est clairement démarqué par une forte contraction (indiquée par des valeurs de déformations volumiques positives). Un cisaillement

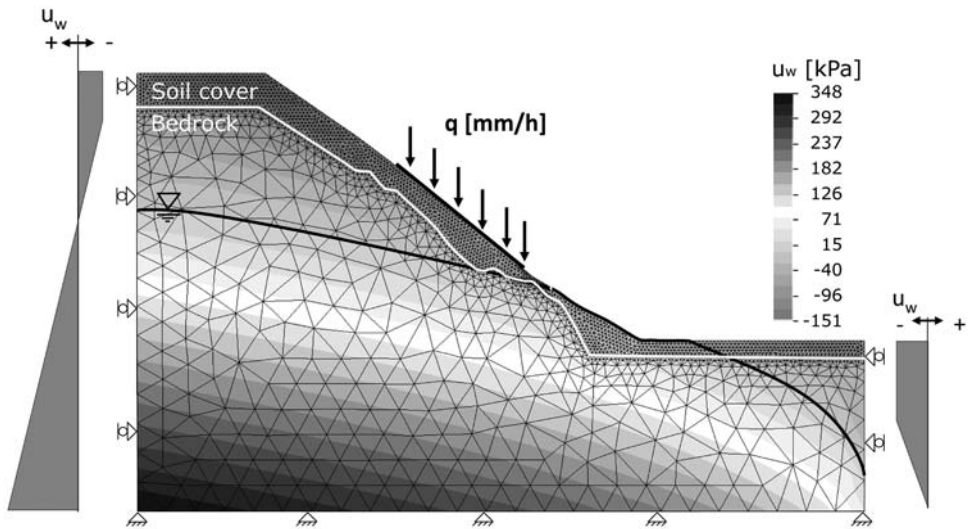


Figure 3.—Modèle d'éléments finis avec les conditions de bord et initiales. La couche de sol reposant sur le substratum rocheux est initialement partiellement saturée. La nappe phréatique se trouve dans le substratum rocheux et s'incline en direction de la pente du versant. Après initialisation des contraintes dans le sol et des pressions interstitielles, un flux d'eau est imposé à la surface du versant pour simuler la pluie artificielle de l'expérience in-situ.

Finite element model with boundary and initial conditions. The soil cover mantling the bedrock is initially in a state of partial saturation. The groundwater table is located in the bedrock and is inclined in the direction of the slope. After initialisation of stresses and pore pressures, a water flux is imposed at the slope surface in order to simulate the artificial rainfall from the in-situ experiment.

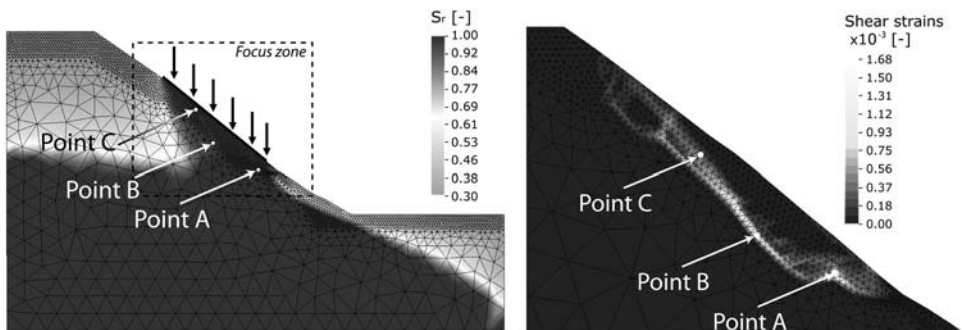


Figure 4.—Infiltration d'eau dans une pente partiellement saturée (gauche); Contours des déformations déviatrices après 3.5 jours d'infiltrations. Les zones claires indiquent une concentration des déformations de cisaillement et permettent l'identification d'un mécanisme de rupture (droite).

Rain infiltration in a partially saturated slope (left); Contours of deviatoric deformations after 3.5 days of infiltration. The light zones indicate a concentration of shear strains and delineate a probable failure mechanism (right).

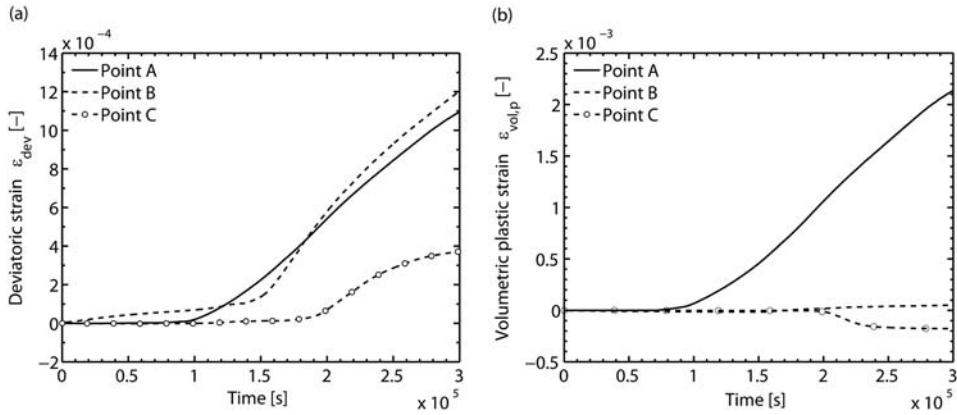


Figure 5.—(a) Evolution des déformations déviateurs: une augmentation forte des déformations déviateurs peut être observé en premier dans la partie basse du versant, suivi par la partie intermédiaire le long de l'interface entre la couche de sol et le substratum et retardé dans le temps dans la partie supérieure du versant; (b) les déformations volumiques plastiques indiquent une contraction du sol dans la partie inférieure du versant après un jour de pluie. Les déformations volumétriques plastiques sont faibles dans la partie intermédiaire et dans la partie supérieure une dilatation du sol résulte des calculs.

Evolution of deviatoric (a) and volumetric plastic (b) deformations. (a) Evolution of deviatoric strains: a strong increase of deviatoric strains is first observed in the lower part of the slope, followed by the intermediate part along the soil cover- bedrock interface. Shear strains develop delayed in time in the upper part of the slope; (b) volumetric plastic strains indicate contraction of the soil in the lower part of the slope after one day of rainfall infiltration. Volumetric plastic strains are negligible in the middle part and dilatant soil behaviour is observed in the upper part of the slope.

conséquent est constaté peu après. Le point B situé au milieu du glissement subit des fortes déformations déviatoriques à changements de volume très faibles. Le point C situé dans la partie supérieure du glissement montre une réaction tardive par rapport aux autres points. On y observe du cisaillement, ainsi qu'une extension volumique due à la nature dilatante du sol.

L'analyse temporelle permet de conclure que le mécanisme de rupture s'est développé principalement dans la partie inférieure du glissement à la suite d'une contraction du sol avec diminution de contraintes effectives moyennes et s'est ensuite propagé vers le haut le long de l'interface entre le substratum rocheux et la couverture de sol pour finalement aboutir à la surface de la pente. Les changements volumiques calculés dans le modèle numérique peuvent être interprétés comme signes précurseurs de rupture d'un terrain en pente. Des tassements ont effectivement été observés à la surface de la pente au préalable du déclenchement du glissement de terrain.

La forte augmentation du degré de saturation en eau accompagnée par de fortes réductions de volume du squelette solide indique de façon qualitative le potentiel de déclenchement rapide de la masse instable.

ANALYSES NUMÉRIQUES DE GLISSEMENTS SUPERFICIELS
POUR L'ÉTABLISSEMENT DE SEUILS DE PRÉCIPITATION

De nombreuses observations et analyses du déclenchement de glissements superficiels suite à des événements pluvieux existent. Les courbes avec seuil critique d'intensité-durée de pluie ont été proposées dans les années 80 comme méthode de prédiction des glissements de terrain issus d'événements pluvieux (CAINE 1980). Une étude bibliographique détaillée sur ce sujet est donnée dans GUZZETTI *et al.* (2008). Cette approche purement empirique basée sur les statistiques de glissements de terrain repérés sur site présente néanmoins une applicabilité limitée du fait que le nombre d'événements 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 ainsi que les changements de l'occupation du territoire peuvent sensiblement modifier la susceptibilité aux glissements de terrain.

MOSER & HOHENSINN (1983) ont enregistré environ 140 glissements de terrain dans le milieu alpin de la Carinthie qu'ils ont rapporté ensuite dans un graphe d'intensité-durée de pluie (figure 6). Dans la figure 6, les résultats provenant de calculs numériques 1D (TARANTINO & MONGIOVI 2003) et 2D (EICHENBERGER *et al.* 2010b) sont comparés aux observations in-situ. On peut constater que les modélisations numériques montrent les mêmes tendances que les observations, à savoir de courtes durées jusqu'à la rupture pour des fortes intensités de pluie et vis-versa.

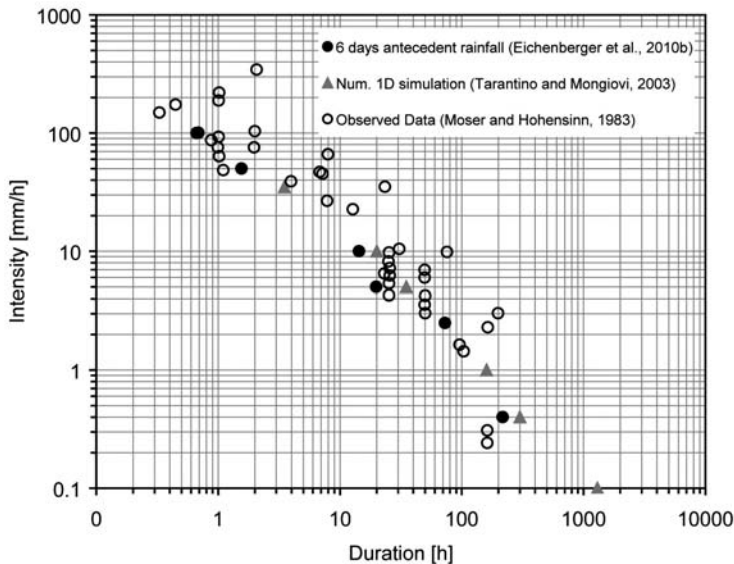


Figure 6.—Couples d'intensité-durée de pluie critique pour la stabilité de versants selon les calculs numériques 2D (EICHENBERGER *et al.* 2010b), l'analyse 1D de TARANTINO & MONGIOVI (2003) et les observations in-situ par MOSER & HOHENSINN (1983).

Critical rainfall intensity-duration couples for slope stability according to numerical 2D calculations (EICHENBERGER *et al.* 2010b), 1D analysis (TARANTINO & MONGIOVI 2003) and in-situ observations (MOSER & HOHENSINN 1983).

Les versants alpins de la Carinthie sont souvent composés de schistes cristallins peu perméables avec une couverture de sol de 2 m d'épaisseur en moyenne. La modélisation à deux dimensions d'un versant représentatif permet en particulier de tenir en compte des flux d'eau souterrains parallèles à la pente juste au-dessus du substratum. Les zones saturées représentent en plus des chemins préférentiels à l'écoulement d'eau due à la conductivité hydraulique plus élevée des milieux saturés vis-à-vis des milieux partiellement saturés.

Les modélisations 2D en question ont été réalisées à l'aide du logiciel d'éléments finis Z_Soil (ZACE SERVICES LTD, 2009). Le sol a été modélisé par une loi élastique-parfaitement plastique avec un critère de rupture du type Mohr-Coulomb. L'augmentation de la résistance au cisaillement en présence de succion a été considérée par le biais de la définition de la contrainte effective pour des sols à degré de saturation en eau variable (Equation 1). La méthode de réduction de paramètres de résistance au cisaillement (SSRFEM) a été utilisée pour les calculs de stabilité de versant. Comme pour les sols saturés, l'écoulement d'eau dans les sols partiellement saturés suit la loi de Darcy, mais pour tenir compte de la présence d'air la perméabilité relative à l'eau est exprimée en fonction du degré de saturation.

Le modèle géo-mécanique tient compte d'un certain nombre de processus physiques dans ces pentes raides partiellement saturées pendant l'infiltration et permet de distinguer différents mécanismes de rupture en fonction des conditions hydrauliques initiales, des caractéristiques hydrauliques du sol et du type de précipitation. Ainsi, pour une gamme de conductivité hydraulique de sol entre 10^{-4} et 10^{-6} m/s et un événement pluvieux donné, les mécanismes de rupture ne sont pas les mêmes (figure 7). Dans les sols relativement perméables, l'eau peut s'infiltrer jusqu'au substratum, s'y accumuler et faire monter les pressions interstitielles. La résistance au cisaillement est réduite le long du substratum jusqu'à ce qu'une rupture se produise (figure 7b).

Les glissements de terrain reportés par MOSER & HOHENSINN (1983) ont eu lieu pour la plupart en printemps dus aux fortes précipitations accompagnées par une fonte de neige rapide. La susceptibilité à la rupture d'un versant pour un événement pluvieux donné dépend de plusieurs facteurs de prédisposition. Des séries de simulations ont été effectuées pour mettre en particulier en évidence le rôle du degré de saturation en eau du sol au préalable d'un événement pluvieux majeur. La figure 8 montre notamment l'influence de précipitations ou de fonte de neige de trois, respectivement six jours avant l'événement majeur sur le couple d'intensité-durée de pluie critique. On peut constater que dans la majorité des cas, les durées critiques de pluie diminuent avec la durée des pluies antécédentes pour une intensité donnée. Pour certains cas, une analyse plus détaillée des flux d'eau, des pressions interstitielles et du mécanisme de rupture est nécessaire pour comprendre la rupture prédite par le modèle (EICHENBERGER *et al.* 2010b).

En conclusion, les approches géo-mécaniques 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 versants. Les simulations numériques à la base de modèles géomécaniques permettent notamment d'étudier l'influence individuelle des différents facteurs liés à la nature des sols et aux sollicitations environnementaux qui mènent à la rupture d'une pente. Le grand avantage de ces modèles physiques est qu'ils peuvent être intégrés aux systèmes de prévention et d'alerte pour les glissements de terrain

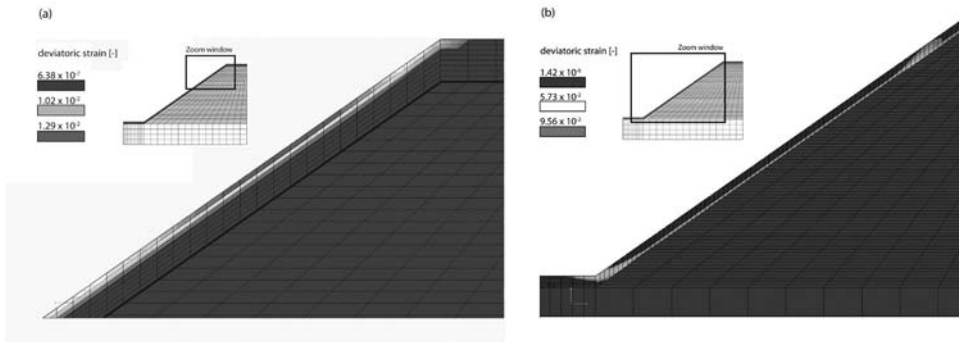


Figure 7.—Déformations déviatrices correspondant aux mécanismes de rupture les plus probables. (a) Mécanisme de rupture superficiel pour une faible conductivité hydraulique ($k_{\text{sat}}=10^{-6}$ m/s) indiqué par les variations importantes de déformations de cisaillement; (b) Localisation des déformations le long de l'interface entre le substratum quasiment imperméable et le colluvium ($k_{\text{sat}}=10^{-4}$ m/s).

Deviatoric deformations corresponding to the most probable failure mechanisms. (a) Shallow failure mechanism for low soil hydraulic conductivity ($k_{\text{sat}}=10^{-6}$ m/s) indicated by zones of sharp variations in shear strains; (b) Localisation of deformations along the interface between a relatively impermeable bedrock and the colluvium ($k_{\text{sat}}=10^{-4}$ m/s).

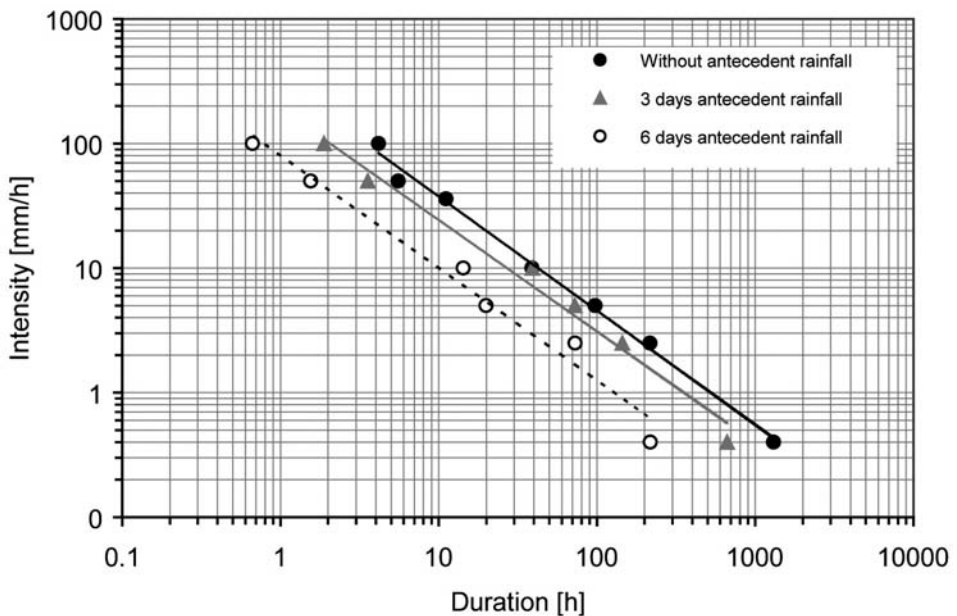


Figure 8.—Courbes d'intensité-durée de pluie pour différentes conditions hydrauliques initiales au préalable d'un évènement pluvieux majeur obtenues par des simulations numériques.

Rainfall intensity-duration curves for different initial hydraulic conditions prior to the major rainfall event.

induits par les précipitations qui sont basés sur des mesures in-situ de valeurs physiques. Les simulations numériques peuvent alors servir d'abord pour concevoir le layout du système d'alerte pour un site défini, et ensuite pour définir des seuils critiques de valeurs physiques mesurées.

PERSPECTIVES POUR LE DÉVELOPPEMENT DES OUTILS DE PRÉDICTION NUMÉRIQUES

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 (p.ex. surveillance à distance et acquisition automatique de données par laser, extensomètres, GPS, etc.). Les modèles géo-mécaniques et statistiques (p.ex. réseaux de neurones artificiels) pour la prédiction des mouvements de terrain peuvent ainsi profiter de données d'entrée en plus grande quantité et en temps réel. Dans cette perspective, il est possible de développer des 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 prédiction se font aussi en génie civil pour les structures existantes.

A l'échelle régionale ou à l'échelle d'un talus, 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 (SAITO 1965, FUKUZONO 1985, VOIGHT 1988, CROSTA & AGLIARDI 2003). 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 (BONNARD 2006, EBERHARDT 2008). 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 (MAYORAZ & VULLIET 2002).

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'apprentissage. 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'apprentissage des réseaux de neurones (figure 9). Le réseau de neurones optimisé par les deux phases d'apprentissage pourra ensuite être utilisé comme outil indépendant, rapide et idéal pour les prédictions en temps réel.

CONCLUSIONS

Avec les récents progrès en matière de modélisation numérique du comportement des sols, il est aujourd'hui possible d'évaluer les effets des différents scénarios climatiques sur la stabilité des versants. 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 prédiction dans le futur.

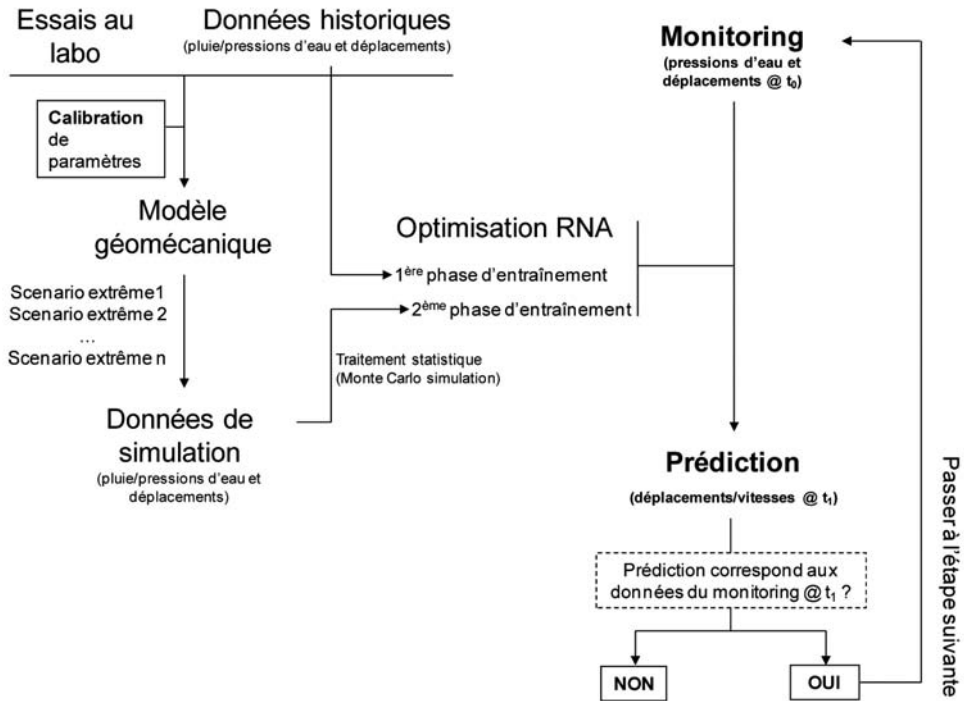


Figure 9.—Outil couplé déterministe-statistique pour la prédiction du comportement de grands glissements de terrain. L'entraînement du réseau de neurones artificiel (RNA) est enrichi avec des données provenant de simulations numériques pour des conditions climatiques extrêmes.

Coupled deterministic-statistical tool for the prediction of the behaviour of large landslides. Training of the artificial neural network (ANN) enriched with data provided by numerical simulations for extreme climatic conditions.

Dans les limites et capacités à reproduire les processus physiques, les simulations numériques faites avec des modèles relativement simples permettent d'associer des mécanismes de rupture aux observations faites in-situ. Les conditions environnementales critiques à la stabilité des versants peuvent être déterminées.

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

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le support financier de la communauté européenne dans le cadre FP7 «SafeLand: Living with landslide risk in Europe» et le CCES (Competence Center for Environment and Sustainability) dans le cadre du projet national «TRAMM».

BIBLIOGRAPHIE

- APIP, TAKARA K., YAMASHIKI Y., SASSA K., IBRAHIM A. & FUKUOKA H., 2010. A distributed hydrological-geotechnical model using satellite-derived rainfall estimates for shallow landslide prediction system at a catchment scale. *Landslides*, 7(3): 237-258.
- ASKARINEJAD A., 2009. A method to locate the slip surface and measuring subsurface deformations in slopes. *4th Intern. Young Geotechnical Engineers Conf.*, Alexandria, Egypt: 171-174.
- BAFU, 2007. Kimaänderung in der Schweiz: Indikatoren zu Ursachen, Auswirkungen, Massnahmen. Bern: 77 p.
- BONNARD C., 2006. Evaluation et prédiction des mouvements des grands phénomènes d'instabilité de pente. *Bulletin angewandter Geologie*, 11(2): 89-100.
- CAINE N., 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geogr. Ann.* 62: 23-27.
- CHARLIER R., 1987. Approche unifiée de quelques problèmes non linéaires de mécanique des milieux continus par la méthode des éléments finis. *PhD thesis*, Université de Liège: Belgium.
- COLLIN F., 2003. Couplages thermo-hydro-mécaniques dans les sols et les roches tendres partiellement saturés. *PhD thesis*, Université de Liège: Belgium.
- CROSTA, G. & AGLIARDI, F., 2003. Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements. *Canadian Geotechnical Journal* 40: 176-191
- EBERHARDT E., WATSON A. D. & LOEW S., 2008. Improving the interpretation of slope monitoring and early warning data through better understanding of complex deep-seated landslide failure mechanisms. *Landslides and Engineered Slopes: From the Past to the Future*, Vols 1 and 2: 39-51.
- EICHENBERGER J., NUTH M. & LALOU L., 2010a. Modeling landslides in partially saturated slopes subjected to rainfall infiltration. Chapter of the book "Mechanics of unsaturated geomaterials", Eds. L. Laloui, John Wiley & Sons: 235-250.
- EICHENBERGER J., FERRARI A. & LALOU L., 2010b. Rainfall thresholds for shallow landslides based on a numerical analysis. *In Mountain Risks: Bringing Science to Society*, J.-P. Malet, T. Glade and N. Casagli (eds), CERG Editions, Strasbourg, France: 67-72.
- FUKUZONO T., 1985. A new method for predicting the failure time of a slope. *Proceedings of the 4th International Conference and Field Workshop on Landslides*, Tokyo. Tokyo University Press, pp.145-150.
- GODT J.W., BAUM R.L., SAVAGE W.Z., SALCIARINI D., SCHULZ W.H. & HARP E.I., 2008. Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Engineering Geology*, 102(3-4): 214-226.
- GODT J.W., BAUM R.L. & LU N., 2009. Landsliding in partially saturated materials. *Geophysical Research Letters*, 36, L02403: 1-5.
- GUZZETTI F., PERUCCACCI S., ROSSI M. & STARK C.P., 2008. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides* 5(1): 3-17.
- JOHNSON K.A. & SITAR N., 1990. Hydrologic conditions leading to debris-flow initiation. *Canadian Geotechnical Journal*, 27(6): 789-801.
- LALOU L., FERRARI A. & EICHENBERGER J., 2010. Effect of climate change on landslide behaviour. *Geo-Strata – Geo Institute of ASCE*, 14(5), September/October 2010: 36-41.
- LU N. & LIKOS W.J., 2004. *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., 556 p.
- MAYORAZ F. & VULLIET L., 2002. Neural networks for slope movement prediction. *International Journal of Geomechanics*, 2(2): 153-173.
- MONTGOMERY D.R., SCHMIDT K.M., DIETRICH W.E. & MCKEAN J., 2009. Instrumental record of debris flow initiation during natural rainfall: implications for modeling slope stability. *Journal of Geophysical Research*, 114, F01031: 1-16.

- MOSER M. & HOHENSINN F., 1983. Geotechnical aspects of soil slips in alpine regions. *Eng. Geol.*, 19, 185-211.
- NUTH M. & LALOU L., 2007. New insight into the unified hydro-mechanical constitutive modelling of unsaturated soils. *Unsat Asia 2007*, Nanjing: 109-125.
- NUTH M. & LALOU L., 2008. Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils. *Computers and Geotechnics*, 35(6): 835-844.
- OCCC/PROCLIM, 2007. Klimaänderungen und die Schweiz 2050: Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. Bern: 168 p.
- SAITO, M., 1965. Forecasting the time of occurrence of slope failure. In *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montréal, Que., University of Toronto Press, Toronto, Ont. Vol. 2, 537-542.
- SPRINGMAN S.M., KIENZLER P., CASINI F. & ASKARINEJAD A., 2009. Landslide triggering experiment in a steep forested slope in Switzerland. *17th Intern. Conf. of Soil Mech. & Geot. Eng.*, Alexandria, Egypt: 1698 - 1701.
- TARANTINO A. & MONGIOVI L., 2003. Numerical modelling of shallow landslides triggered by rainfall. In L. Picarelli (ed.) *International Conference on Fast slope movements – prediction and prevention for risk mitigation*, Naples, May 11-13: 491-495.
- VOIGHT B., 1988. Materials science law applied to time forecast of slope failure. In: *5th International Symposium on Landslides*, R. C. Bonnard. A.A. Balkema, The Netherlands, Editor.: Lausanne, Switzerland. 1471-1472.
- ZACE SERVICES LTD., 2009. Z_Soil 2D, Version 9, Finite Element Code and User Manual.