Zeitschrift: Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

Herausgeber: Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

Band: 24 (2019)

Heft: 2

Artikel: Cartographie en temps réel et système de pré-alerte pour les glissements de terrain dans les Alpes Suisses : la méthode OLPAC

Autor: Chéneau, Pierre / Risser, Vincent

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-869532

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: 12.07.2025

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

Swiss Bull. angew. Geol. Vol. 24/2, 2019 S. 55-66

Cartographie en temps réel et système de pré-alerte pour les glissements de terrain dans les Alpes Suisses: La méthode OLPAC

Pierre Chéneau [1], Dr. Vincent Risser [1]

Key words: landslides, mudslide, hazard potential, real-time cartography, deterministic model, early warning system

Abstract:
Superficial and spontaneous landslides and mudslides are a common phenomenon in mountain areas. In the region of the Swiss Alps, they are mainly triggered by precipitations of high intensity or their succession in a short scale of time. This phenomenon isn't specific to the Alps but can be observed in all mountain areas around the world. With the augmentation of violent episode of precipitation due to global warming, spontaneous landslides are likely to become more and more regular, turning into earthflow, debris flow or mudflow. These processes could become very destructive for the population and their goods. Detection of landslides hazard potentialities in real-time is a major challenge in the years to come. The OLPAC (Operational Landslides Prevision and Alert Cartography) methodology, designed to respond to this problematic is here presented. It integrates the combination of two major components: a slope stability theory, a dynamic hydrogeological model. This deterministic methodology is the result of 23 years of researches and successive developments. This model is currently running on the region of the Val-d'Illiez (Valais, Suisse), which is regularly affected by spontaneous landslides and muldslides particularly during the May 2015 event. The detection effectiveness can be increased by setting a short time prediction of landslides hazard potentialities obtained thanks to predictive meteorological data.

Résumé:
Les glissements de terrains superficiels spontanés et coulées de boue sont un phénomène courant dans les régions montagneuses. Dans la région des Alpes Suisses, ils sont principalement déclenchés par des précipitations de haute intensité ou bien une succession de pluies dans un intervalle de temps court. Ce phénomène n'est pas spécifique aux Alpes mais peut être observé dans n'importe quelle chaîne montagneuse du monde. Avec l'augmentation attendue des épisodes de précipitations intenses en raison du changement climatique, les glissements de terrains spontanés devraient devenir de plus en plus fréquents, pouvant évoluer en coulées boueuses ou alimenter des laves torrentielles. Ces processus peuvent générer des risques élevés pour les populations et les biens matériels. La détection en temps réel des zones exposées à ce type de mouvements de terrain est un enjeu majeur pour les années à venir. La méthodologie OLPAC (Operational Landslides Prevision and Alert Cartography), créée afin de répondre à cette problématique est présentée. Elle intègre la combinaison de deux composants majeurs: une formulation de stabilité des pentes, et un modèle hydrogéologique dynamique. Cette méthodologie déterministe est le fruit de plus de 23 années de recherches et de développements successifs. Ce modèle fonctionne actuellement sur la région du Val-d'Illiez (Valais, Suisse), qui est régulièrement affecté par des glissements de terrains et coulées spontanés; un épisode particulièrement marquant est survenu en mai 2015. L'efficacité de détection peut être améliorée en intégrant un système de prédiction à court terme obtenu grâce à des données météorologiques prévisionnelles.

Mots clés: glissements de terrains, coulées boueuses, potentiel de risque, cartographie en temps réel, modèle déterministe, système de pré-alerte.

[1] Prévention des Risques Naturels-Conseils et Stratégies 512 Sàrl, c/o Nicod, Avenue du Théâtre 2, 1870 Monthey

1 Introduction

Les glissements de terrains superficiels et coulées de boue représentent un danger important dans les zones montagneuses notamment à cause de la recrudescence d'épisodes de pluies intenses. Actuellement, il est difficile de faire une prévision de la survenance de tels évènements, qui soit suffisamment plausible et fine (spatialement et temporellement) pour être réellement utile en termes de prévention. Cette lacune – en comparaison par exemple avec le domaine des crues – a été identifiée de longue date. Il est donc nécessaire de développer des outils d'aide à la décision alertant de façon précoce les autorités et les services compétents de la survenance possible d'instabilités de terrain dans un horizon de temps déterminé. De cette façon, les mesures d'urgence nécessaires peuvent être décidées et mises en œuvre conformément aux plans d'urgence préétablis, et ce de façon anticipée. C'est dans ce contexte que l'Office fédéral de l'environnement OFEV et le canton du Valais ont apporté leur soutien à ce projet.

Pour rappel, de tels systèmes d'alerte s'inscrivent dans le cadre des mesures de préparation et complètent les autres mesures de réduction des risques, notamment les mesures de prévention, qu'elles soient constructives ou biologiques, ou encore d'aménagement du territoire. L'ensemble de ces mesures relève de la gestion intégrée des risques.

Cet article présente ainsi une réponse possible à la problématique posée, sous forme d'un modèle déterministe permettant de prendre en compte ces événements ponctuels afin de réaliser une cartographie en temps réel des dangers potentiels de formation de mouvements de terrains spontanés. Il s'agit d'un système de pré-alerte destiné aux autorités en charge de la sécurité. Il utilise des données qui sont généralement disponibles, notamment: l'altimétrie, la géologie et l'occupation des sols. Les premiers tests en temps réel sont réalisés sur le Val-d'Illiez (Canton du Valais, Suisse) sur une zone de 230 km^2.

Dans un premier temps les deux composantes qui structurent le modèle sont décrites: la formulation du coefficient de stabilité des pentes et le modèle hydrogéologique, de même que leur implémentation. Les résultats obtenus dans le secteur du projet pilote sont présentés dans un deuxième temps.

2 La méthode OLPAC

2.1. Les données de base nécessaires au modèle

Pour effectuer ses calculs, le modèle a besoin (Figure 1):

- D'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) dont la résolution est importante pour les calculs (ici la maille est de 10m, ce qui permet d'être suffisamment précis pour travailler sur de grandes étendues). Ces données sont générées grâce au LIDAR et sont ensuite ré-échantillonnées à l'échelle souhaitée. Elles sont fournies par swisstopo;
- D'une carte d'occupation des sols: vecteur 25k, qui permet de déterminer les coefficients d'infiltration des sols. Celle-ci est issue de la vectorisation de la carte nationale au 1:25'000;
- D'une carte géologique dont la précision devrait permettre de bien différencier les formations superficielles (Atlas géologique suisse AG25). Les formations sont reclassées en fonction de leurs caractéristiques géotechniques et hydrogéologiques, induisant des comportements comparables vis-à-vis des dispositions à l'instabilité. Dans ce cas précis du Val d'Illiez, la carte litholo-

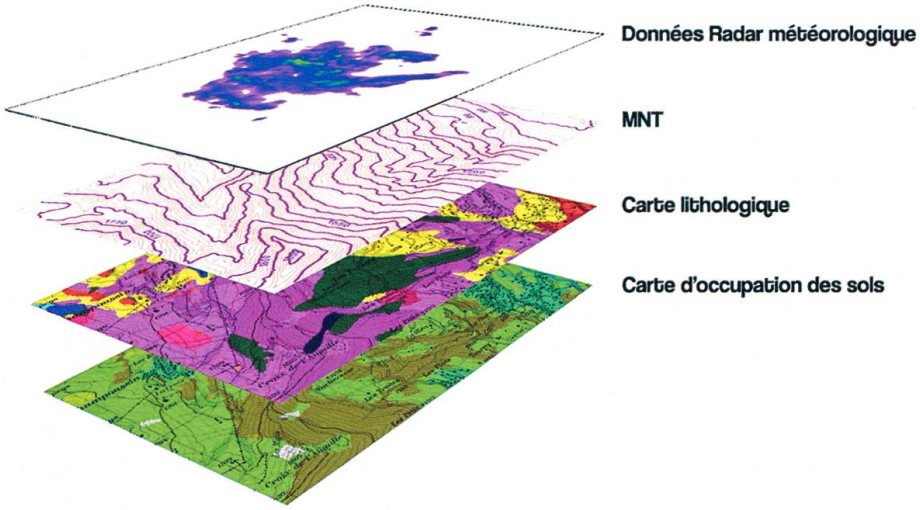

Fig. 1: Données nécessaires à l'utilisation du modèle en temps réel.

gique disponible a été enrichie par les travaux de terrain réalisés par Bernard Loup et Raphaël Mayoraz dans le cadre de leurs travaux de diplôme effectués en 1985-1987 dans le Haut Val d'Illiez;

- De données météorologiques pluviométriques qui peuvent être issues de données historiques ou générées par les coefficients de Montana (pluies de projets; voir explications complémentaires au point 2.5). Ces données permettent d'effectuer les simulations dans la phase de calibrage. Pour le système d'alerte ou de pré-alerte proprement dit, les données acquises en temps réel (pluviographes, radar météorologiques) de même que les données prévisionnelles sont nécessaires. L'ensemble de ces données provient de MétéoSuisse.

Pour la phase de calibrage, il est nécessaire d'avoir une cartographie précise des glissements passés ainsi que leurs dates (cadastre des événements) et de disposer d'informations sur la quantité de pluie tombée durant l'événement pluvieux à l'origine de ces glissements.

Cette phase d'acquisition et de préparation des données est importante et nécessite un temps de travail conséquent. L'ensemble des données est intégré sous forme matricielle dans le système OLPAC. Comme ces matrices doivent avoir la même dimension, le travail préparatoire, pour homogénéiser ces données, peut prendre plusieurs jours.

2.2 Le glissement plan infini

La formulation du coefficient de stabilité des pentes utilisé est celui d'un glissement plan infini parallèle à la pente dans une seule couche homogène. Ce critère est formulé grâce à la comparaison entre les résistances mobilisable et utile (Critère de Mohr-Coulomb; Skempton, 1957; Figure 2).

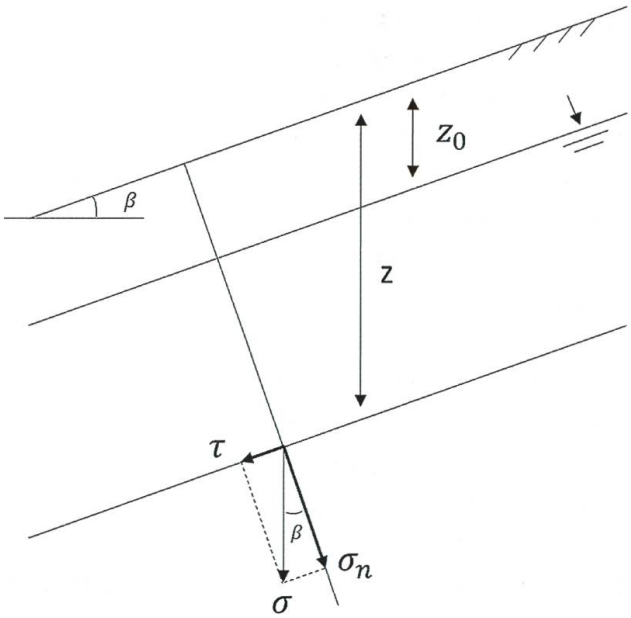

Fig. 2: Schéma permettant d'établir les différentes résistances mises en jeu lors d'un glissement plan infini. Avec σ_n permettant de calculer la résistance maximale mobilisable et τ représentant la résistance utile.

$$Fs = \frac{C' + [\gamma(z - h_w) + (\gamma_{sat} - \gamma_w)h_w]\cos^2\beta\tan\varphi'}{\cos\beta\sin\beta\,[\gamma(z - h_w) + \gamma_{sat}h_w]}$$

Où:

- C' est la cohésion (kPa) au niveau du plan de glissement;
- φ' l'angle de frottement interne au niveau du plan de glissement (le ' correspondant à la notation dans un cas drainé);
- z est la hauteur totale de sol (m);
- $h_w = z - z_0$ la hauteur de sol saturé (m);
- γ étant le poids volumique sec (kN/m3);
- γ_{sat} le poids volumique saturé (kN/m3);
- γ_w étant le poids volumique de l'eau (kN/m3);
- β constitue la pente;
- F_s représente le facteur de sécurité.

On considère le terrain comme instable lorsque FS < 1.

Les paramètres C', φ', γ, γ_{sat} et z sont indiqués au modèle par l'intermédiaire de la cartographie des formations superficielles de la zone d'étude. La pente β est calculée à partir du MNT de la zone et h_w va découler de l'évolution du modèle hydrogéologique.

2.3 L'évolution de la cohésion selon l'humidité des sols.

Pour certaines formations, la cohésion varie en fonction du taux d'humidité. Le modèle intègre l'évolution de la cohésion C en fonction de la teneur en eau θ. La cohésion est fixée à sa valeur maximale C_{max} pour la teneur en eau minimale θ_{min} et à sa valeur minimale C_{min} pour la teneur en eau maximale θ_{max}.

L'évolution entre ces deux extrêmes suit la pente décroissante d'une gaussienne centrée sur la valeur de teneur en eau de coupure θ_c (Cf. Figure 3). Cela permet d'obtenir une stabilité maximale lorsque le milieu est sec.

2.4 Le modèle hydrogéologique

Le modèle hydrogéologique est un modèle dynamique utilisant la méthode des différences finies et dont le maillage est tridimensionnel et régulier. Un bilan de flux est effectué pour chaque case du maillage afin de déterminer l'eau résiduelle dans celles-ci à chaque pas de temps. La direction d'écoulement est déterminée par la méthode D∞ (Tarboton, 1997). Ainsi chaque case du maillage possède un flux vertical entrant q_zIn, un flux vertical sortant q_zOut, de 1 à 7 flux latéraux rentrant qIn, provenant des cases voisines et 1 à 2 flux latéraux sortant $qOut$ allant vers des cases voisines (Figure 4). Le maximum de flux latéraux rentrant n'est pas de 8 car un traitement en amont des calculs a été fait sur le MNT afin d'y éviter les creux (Jenson et Domingue, 1988).

Le flux vertical entrant des cases se trouvant en surface est déterminé après calcul de l'infiltration d'une pluie qui peut être donnée sous différents formats: à partir de données provenant directement de pluviomètres ou pluviographes, à partir de fichier provenant de radars météo, ou généré à partir de coefficients de Montana (cf. point 2.5).

L'ensemble des autres flux sont calculés grâce à la loi de Darcy (Darcy, 1856). Lorsque les cases se trouvent dans un état non saturé, la conductivité hydraulique à saturation est pondérée par un facteur permettant de répondre au comportement en milieu non saturé (Van Genuchten, 1980). La formulation de ce facteur pondérant K_{rw} est simplifiée grâce au modèle de Mualem (Mualem, 1976).

$$K_{rw} = S_e(\theta)^{1/2}\left[1 - \left(1 - S_e(\theta)^{1/m}\right)^m\right]^2$$

Où S_e est la saturation effective dépendant de la teneur en eau θ et m un paramètre empirique à déterminer par concordance avec les données expérimentales.

La loi de Darcy en milieu non saturé s'exprime donc de cette manière

$$\vec{q} = -K(\theta)\vec{\nabla}H \quad avec\ K(\theta) = K_{rw}(\theta) * K_{sat}$$

Où $\vec{\nabla}H$ est le gradient hydraulique et K_{sat} la conductivité hydraulique à saturation.

2.5 Les coefficients de Montana

Les coefficients de Montana sont un outil permettant de déterminer une intensité critique de pluie pour une période de retour donnée. Plusieurs formulations permettent de répondre à ce problème, toutes étant fonction de la durée de la pluie. La formulation générale est:

$$i = \frac{k \cdot T^a}{(t+c)^b}$$

i intensité totale [mm/h], [mm/min],
T période de retour en années,
t durée de référence [h] ou [min],
k, a, b, c paramètres d'ajustement.

Il a été proposé une version simplifiée car pour les averses supérieures à 3h, la formulation ci-dessus, généralement utilisée, n'est plus adaptée (Estorge et al, 1980). Cette nouvelle formulation est exprimée sous cette forme:

$$I_{\Delta t} = \frac{a}{(\Delta t)^b} \quad \text{ou} \quad P_{\Delta t} = a \cdot (\Delta t)^{1-b}$$

Δt la durée de la pluie [h]
$I_{\Delta t}$ l'intensité de pluie [mm/h]
$P_{\Delta t}$ le cumul de pluie [mm]

où a et b sont des paramètres qui dépendent de la région et de la période de retour. Ces paramètres sont déterminés grâce à une interprétation des courbes IDF (Intensité, Durée, Fréquence) pour une région donnée. Tous les paramètres nécessaires au calcul des coefficients de Montana se déduisent de l'ensemble des données historiques de pluviométrie d'une station météorologique donnée.

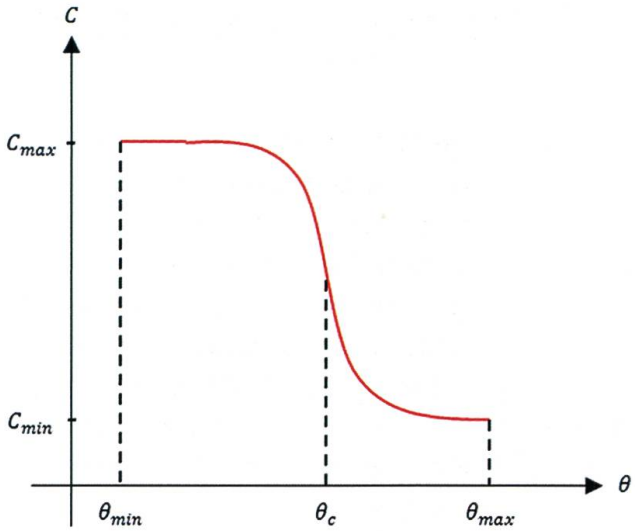

Fig. 3: Représentation schématique de l'évolution de la cohésion en fonction de la teneur en eau.

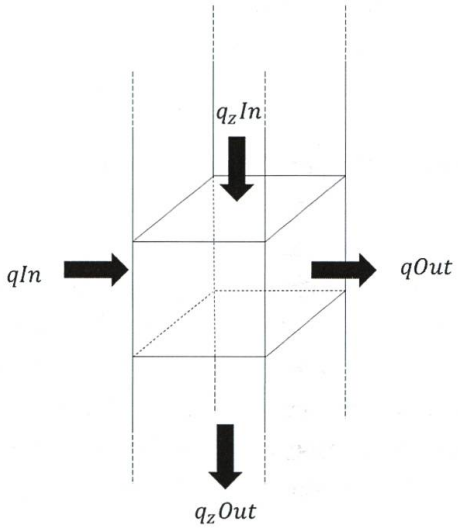

Fig. 4: Ensemble des flux sur une case du maillage.

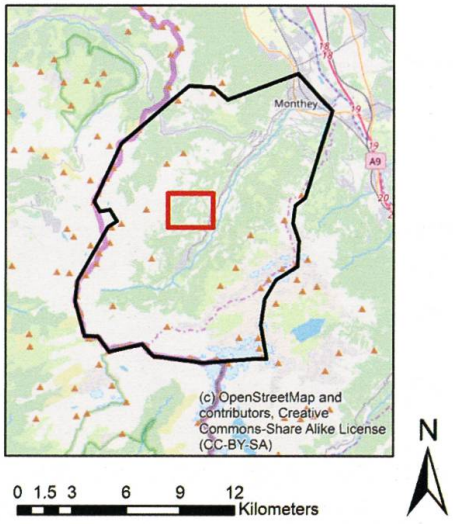

Fig. 5: Localisation de la zone d'intérêt, et limite du projet pilote, Source: Office fédéral de topographie.

3 Le modèle en temps réel sur le Val-d'Illiez

3.1 Etalonnage du modèle

L'étalonnage du modèle s'effectue en comparant les résultats de celui-ci avec la carte des événements passés, associée à la distribution des pluies correspondantes. Celle-ci est obtenue par l'enregistrement de pluviographes, les données radars météorologiques ou la génération par coefficient de Montana d'une pluie similaire. Les formations géologiques ont été regroupées en formation lithologiques dites «homogènes» ayant les mêmes caractéristiques géotechniques (10 classes dans cette étude pilote, Cf. Figure 6) Chaque formation lithologique est caractérisée par des paramètres géotechniques et hydrogéologiques. Une partie d'entre eux est situé dans une fourchette de valeurs, car ces données proviennent de mesures effectuées sur des régions différentes. La phase de calibrage consiste à choisir la valeur du paramètre qui permet de reproduire au mieux les événements documentés.

De même, les données provenant du cadastre ont été regroupées par zones ayant le même comportement d'infiltration des sols (ici 9 classes Cf. Figure 7)

Cette phase d'étalonnage permet aussi d'établir quel sera le seuil de déclenchement d'alerte. Celui-ci est en relation avec la surface maximale de terrains instables pour une situation de référence.

Dans le cas du Val-d'Illiez l'étalonnage a été effectué à l'aide des données relevées au pluviographe de Champéry (Cf. Figure 8) et des données radar du 1er au 5 mai 2015 où il est tombé, en l'espace de 3 jours, plus de 300 mm de pluie. Le fichier radar comporte cependant une erreur de modélisation, la pluie

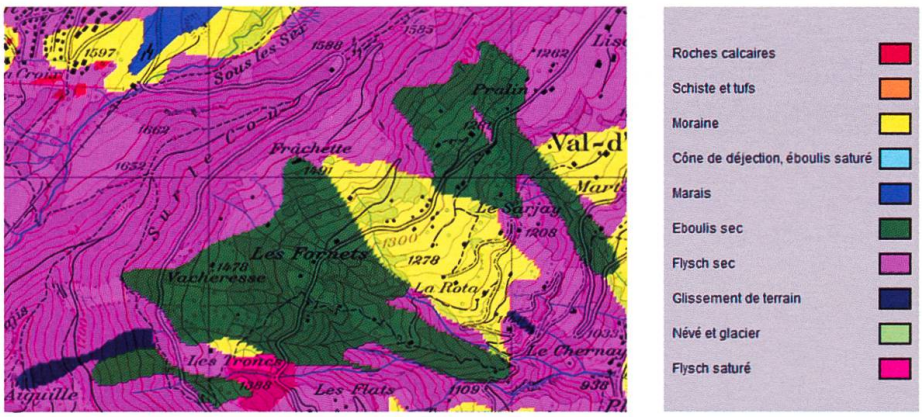

Fig. 6: Carte lithologique du Val d'Illiez.

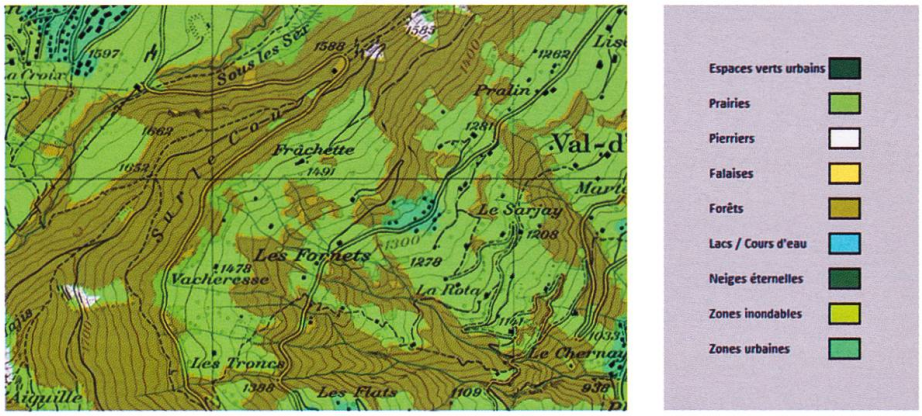

Fig. 7: Carte d'occupation des sols du Val d'Illiez.

indiquée dans la partie Nord du Val d'Illiez étant en effet sous-estimée et inférieure à la quantité de pluie relevée sur le terrain par un pluviographe. La calibration s'est donc effectuée avec les données du pluviographe de Champéry pour les deux-tiers Nord du Val d'Illiez (du Nord de Champéry à Monthey) et avec les données radar pour le tiers Sud.

Pour des questions de visibilité, les données sont présentées sur une petite partie du territoire (Cf. encadré rouge sur la Figure 5). La Figure 6 montre la carte lithologique utilisée pour la modélisation. En fonction de l'occupation des sols, un coefficient d'infiltration est attribué (Cf. Figure 7). Celui-ci permet de calculer la quantité d'eau précipitée qui s'infiltre dans le sol.

Les résultats montrent une relative bonne corrélation entre les phénomènes observés et la cartographie des zones instables (Cf. Figure 9). Quelques glissements observés ne se trouvent pas dans les zones calculées comme étant potentiellement instables. Ceci est dû principalement à la cartographie existante de la lithologie qui classe ces zones en substratum. Il faut noter qu'une correspondance à 100% ne peut pas être atteinte – et ne le sera jamais, même avec les meilleures données de base possibles: d'autres facteurs, notamment anthropiques, et ne pouvant être

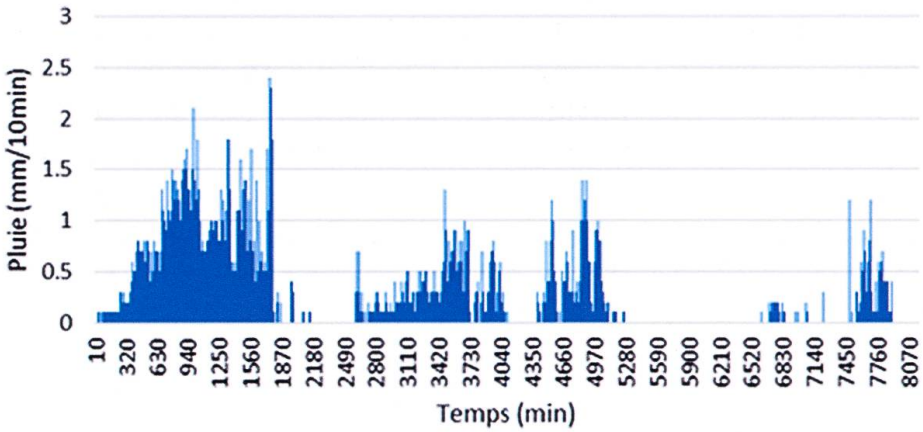

Fig. 8: Evénement pluvieux du 1er au 5 mai 2015 (Champéry).

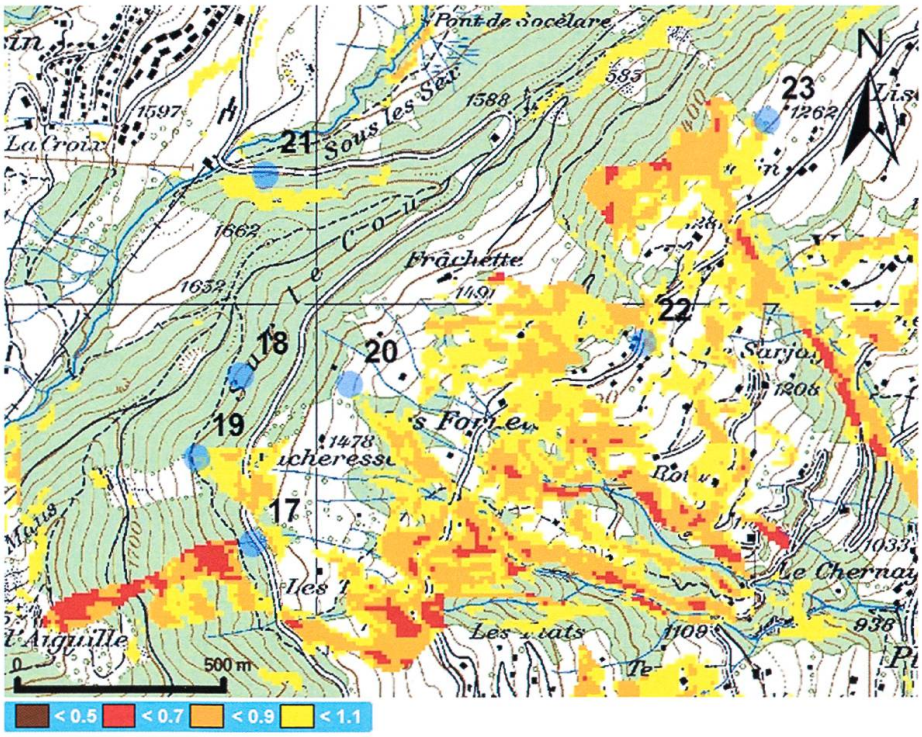

Fig. 9: Carte des Facteurs de sécurité pour la pluie enregistrée à Champéry du 1er au 5 mai (256mm) avec l'emplacement des glissements observés en 2015 (points bleus, avec numéro d'événement).

inclus dans le modèle, peuvent jouer un rôle déterminant.

La phase de calibrage qui permet de valider et d'affiner les paramètres du modèle est indispensable. L'année exceptionnelle de 2015 a servi de référence. Cette phase représente un travail important où les résultats des simulations du modèle sont comparés avec les faits historiques.

3.2 Les résultats en temps réel

Une fois les paramètres calés, l'ensemble des données a été intégré dans le programme OLPAC Web.

Quelques caractéristiques de la modélisation en temps réel: les données pluviométriques radar en temps réel sont transmises par MétéoSuisse toutes les 5 min, les données pluviométriques radar prévisionnelles (COSMO1: Consortium for Small-Scale Modelling) sur 6h sont transmises toutes les 3h. Cela permet d'actualiser le modèle en temps réel toutes les 5 min et d'effectuer des modélisations prévisionnelles toutes les heures, actualisées grâce à la situation en temps réel (Cf. Figure 10).

L'évolution de la stabilité des terrains peut être consultée en direct sur internet (site avec contrôle d'accès).

En pratique, à chaque fois qu'un fichier radar de temps réel arrive, OLPAC Web calcule les Fs (facteurs de sécurité) du temps réel correspondants. Parallèlement, en fonction de la disponibilité des fichiers radars prévisionnels, OLPAC Web calcule l'évolution des Fs attendus aux temps t +1h, 2h ....+6h maximum (temps maxi actuel de prévision qui est accessible). Ces deux 'process' fonctionnent en parallèle: celui du calcul en temps réel transmet les informations de la situation d'humidité des sols régulièrement à celui du calcul des temps prévisionnels.

La définition du seuil de déclenchement de l'alerte se fait en relation avec une situation passée caractéristique où se sont produits des glissements de terrain. Nous avons pris le mois de mai 2015 (1 au 5) comme période de référence. Pendant cette période, 8% du territoire global (230 km^2) sont devenus instables avec un Fs < à 0.9 (Cf. Figure 11). Or, comme le montrent les observations de terrain, les premiers glissements se sont produits à la fin de la 1ère journée de l'épisode pluvieux, ce qui correspond à 100 mm de précipitations cumulées. La Figure 12, montre que le pourcentage des Fs correspondait à 2% de la superficie totale. Ce pourcentage, redescend assez rapidement à une valeur qui tend vers 0, une fois que les précipitations s'arrêtent (essuyage des terrains). Pour éviter d'avoir dans la fenêtre d'affichage des valeurs qui varient peu (entre 0 et 8%), le

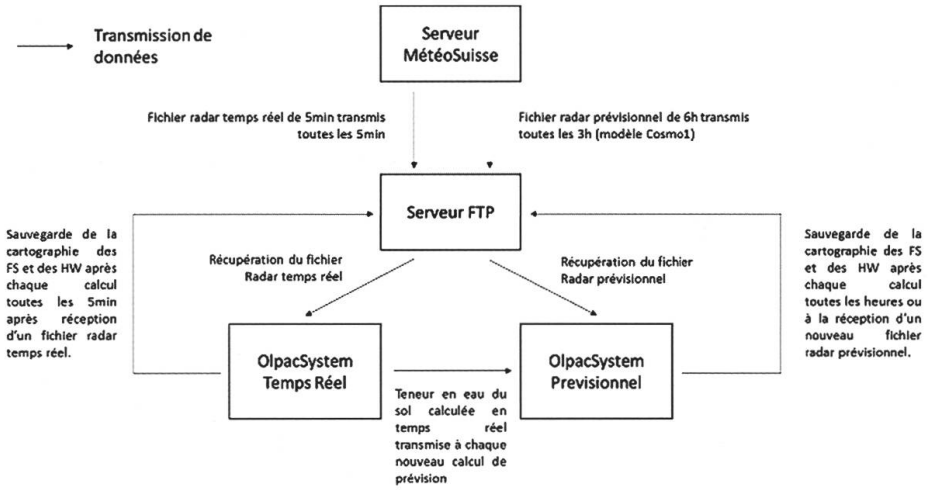

Fig. 10: Schéma de l'organisation des modules Olpac temps réel et prévisionnel (FS: coefficient de sécurité, HW: hauteur de sol saturé).

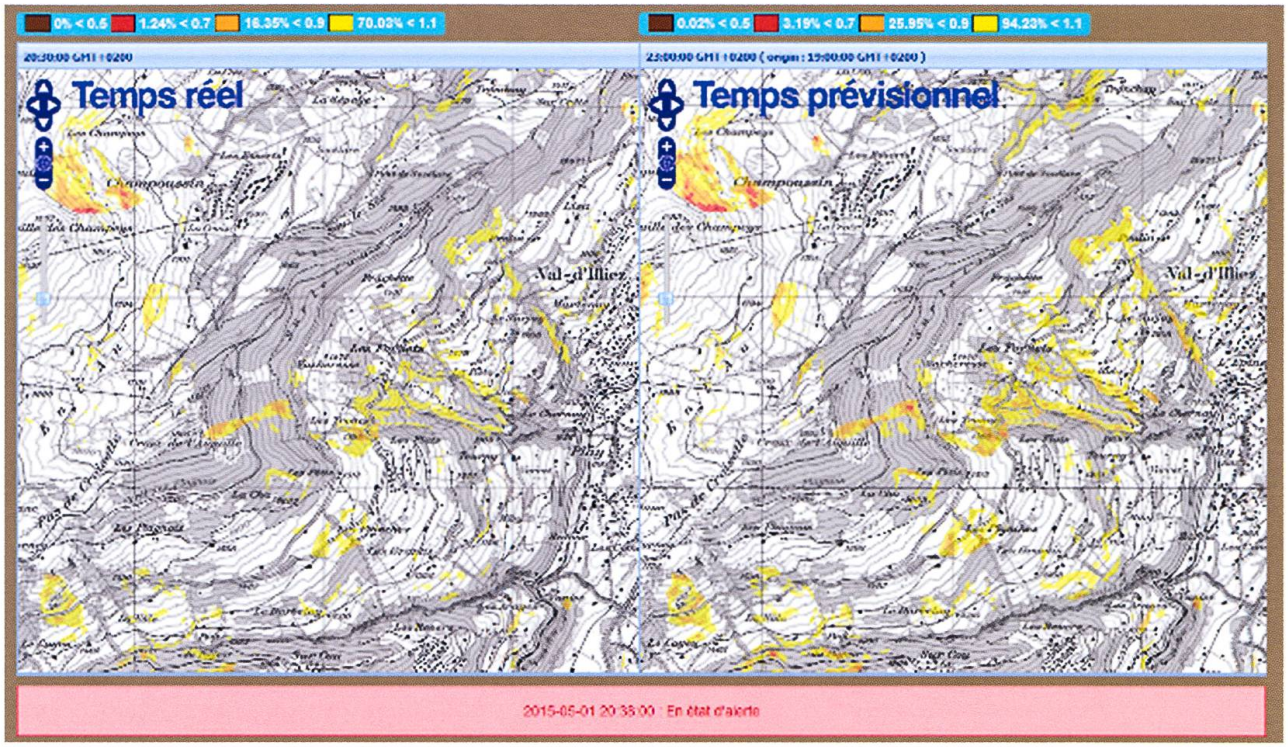

Fig. 11: Situation au 1er mai 2015 à 20h30 temps réel et 23h pour le prévisionnel. Lancement de l'alerte à cause de la prévision de 23h.

pourcentage de terrains instables consécutif à l'évènement de mai 2015 (8%) a été pris comme référence et donc représente 100%. Dans ce cas, la superficie relative des Fs générés par une pluie de 100 mm est de 25%. Ce seuil a été fixé par l'administrateur. Quand ce seuil est atteint, un message d'alerte est envoyé aux personnes et instances prédéfinies dans le système.

Après une période de 6h au moins où le calcul prévisionnel ne prévoit pas de situation d'instabilité supérieure à celle du seuil fixé, un message de fin d'alerte est envoyé.

Depuis la mise en fonctionnement d'OLPAC Web, la région du Val d'Illiez a reçu très peu de précipitations et aucun déclenchement d'alerte n'a été lancé. Nous avons donc utilisé les données de pluies de mai 2015 dans OlpacWeb, en simulation. Les résultats montrent bien la réactivité du modèle et la cohérence du déclenchement d'alerte avec les faits historiques. L'interface internet affiche les pourcentages des différentes classes des coefficients de sécurité, rapportées à la cartographie des zones instables de référence de la zone étudiée (phase d'étalonnage). Pour la simulation du 1er au 5 mai 2015 (Cf. Figure 11), l'alerte aurait été lancée dès le 1er mai à partir de 20h30 car les FS < 0.9 de la prévision de 23h dépassent 25% de la surface maximale occupée par les FS < 0.9 (qui correspond aux 8% de la surface totale, cf. explications ci-dessus).

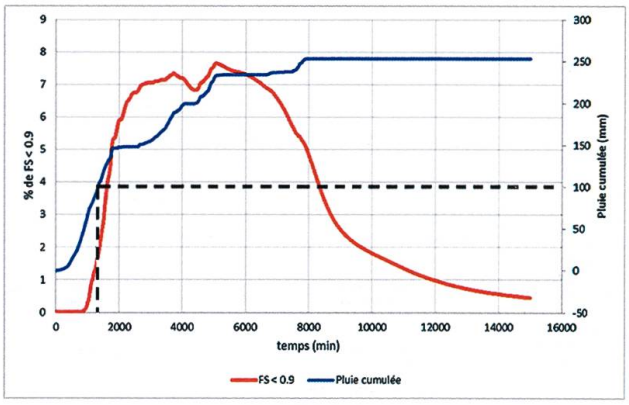

Fig. 12: Evolution de l'occupation des FS < 0.9 pour l'événement majeur de mai 2015, combiné à la pluie cumulée sur cette période.

4 Remarque

Olpac System est un outil évolutif. Il permet d'intégrer les connaissances locales et les aspects spécifiques à chaque région. Des travaux sont en cours pour améliorer le calcul du bilan hydrogéologique en optimisant les transferts tridimensionnels. Ceux-ci sont une clé importante pour mieux comprendre l'évolution de l'état de l'eau dans le sol et donc de mieux estimer le moment du basculement entre stabilité et instabilité, et de pouvoir ensuite déclencher une alerte en temps opportun. En fonction de l'amélioration de la connaissance scientifique, les algorithmes peuvent être modifiés et mis à jour.

A partir des retours d'expériences, les paramètres de déclenchement de l'alerte seront affinés. Ceux-ci, seront adaptés à chaque zone afin d'intégrer au mieux la réalité du terrain par chaque géologue responsable.

5 Adaptabilité

Le modèle OLPAC est robuste et peut être adapté à des échelles régionales et nationales. Il faudrait pour cela réaliser des découpages par zones homogènes (bassin versant par exemple de plusieurs centaines de km^2 à 1500 km^2 environ). Le paramétrage des valeurs nécessite une régionalisation, afin d'être plus proche de la réalité du terrain. L'informatique devra être portée sur des systèmes plus puissants pour pouvoir traiter plusieurs zones en même temps. Le défi consiste à trouver un optimum entre la nécessaire régionalisation des paramètres et des prévisions, d'une part, et, d'autre part, la pertinence et la résolution spatiale et temporelle des résultats et des alarmes émises en vue de leur utilisation par les autorités.

L'expérience du Val d'Illiez montre qu'un découpage du territoire par bassin versant (BV) ou unité géologique homogène permet d'adapter les variables géotechniques et hydrogéologiques aux aspects spécifiques régionaux. Ceci est capital, car cela permet de prendre beaucoup mieux en compte les caractéristiques de chaque formation qui peuvent varier fortement d'une région à l'autre. Concrètement, cela permet d'intégrer les connaissances acquises par les autorités compétentes.

Il est nécessaire de prévoir un temps d'expérimentation ou d'apprentissage dans chaque périmètre défini par les responsables pour apprécier plus justement la notion de seuil d'alerte, variable en fonction de la lithologie et de la disposition générale des zones étudiées. Pour cela, une étude systématique de corrélation devra être menée (en fonction des données disponibles) entre les évènements passés et les évènements pluvieux générateurs, au niveau des cartes de Fs correspondantes.

La phase de retour d'expérience permettra d'affiner, au fur et à mesure des évènements, les seuils retenus (déclenchement et fin alerte) et la classification des niveaux d'alerte.

La disponibilité de cartes géologiques (lithologiques) à jour est nécessaire pour avoir une bonne modélisation des Fs. C'est le facteur le plus déterminant. Il est ainsi d'une part nécessaire d'améliorer encore la cartographie générale actuelle des formations superficielles. D'autre part, il est important de connaître ou de pouvoir estimer les pluies de déclenchement qui ont généré les principaux glissements qui se sont produits: un cadastre des événements le plus exhaustif possible est nécessaire pour la calibration.

6 Discussions et perspectives

Les derniers développements permettent d'intégrer les données issues de la nouvelle carte de ruissellement (OFEV, 2018). Celle-ci est intégrée en pondérant les saturations des sols superficiels, là où il y a des ruissellements. La difficulté pour intégrer les cartes de ruissellement de manière automatique dans le système actuel est liée à l'espace mémoire, car cette donnée est fournie au pas de 1m. Il est nécessaire d'optimiser les temps de calcul et de disposer de mémoires de grande taille.

De même la présence d'un manteau neigeux peut être prise en compte, avec des apports d'eau supplémentaires donnés par la fonte d'une quantité de neige fixée par l'utilisateur, suite à une situation météorologique particulière. La recherche actuellement en cours permet d'intégrer la fonte d'un stock de neige (épaisseur avec une densité donnée) sur un temps limité correspondant à un réchauffement rapide (effet de Foehn). Ce système est déclenché de façon ponctuelle par l'utilisateur. Cette fonctionnalité n'est pas actuellement implémentée dans le système en temps réel. Il est envisageable de pouvoir intégré la présence d'un manteau neigeux et sa fusion de façon automatique. Pour cela, il serait nécessaire de disposer de la cartographie dynamique du manteau neigeux avec son épaisseur, de l'accès en temps réel aux températures et de la connaissance de la forme de la précipitation (liquide ou solide). Un travail important de modélisation devra être réalisé.

La profondeur de substratum peut être variable en fonction des formations, c'est-à-dire que la profondeur du plan de glissement 'théorique' (interface entre les couches superficielles et le substratum) peut varier en fonction des formations. Cette fonctionnalité est opérationnelle dans le système actuel.

De même, le modèle actuel permet de suivre la pluviométrie spécifique sur chaque zone sensible délimitée par l'utilisateur. Il permet de suivre l'évolution de l'instabilité sur chaque zone et d'y déclencher une pré-alerte.

L'ensemble des développements réalisés jusqu'à ce jour constituent une innovation dans le domaine de la prévention des risques naturels liés aux glissements de terrain et coulées boueuses associées. La méthode OLPAC est un système dynamique, qui permet de calculer l'évolution des Fs (Facteur de sécurité) à la fois dans le temps et dans l'espace. L'intégration des données pluviométriques en temps réel en fait un modèle performant. Un grand travail de recherche a été réalisé pour essayer d'estimer le plus précisément possible la variation de l'humidité des sols qui est la clé pour le calcul des Fs. En effet, plus cette connaissance sera réaliste et plus la prévision de pré-alerte sera pertinente. Le modèle hydrogéologique utilisé donne de bons résultats qui ont été comparés avec l'historique des évènements passés.

Les résultats sont spatialisés et permettent d'obtenir des cartes de l'estimation des Fs pour chaque point élémentaire (maille de 10mx10m). La connaissance de la lithologie des sols superficiels est capitale, elle peut être enrichie par toutes les minutes de terrain disponibles et les informations issues du recoupement avec la carte d'occupation des sols (délimitation précise des affleurements rocheux). Dans le contexte de l'étude, le fait d'avoir intégré les cartes réalisées par B. Loup et R. Mayoraz a permis de bien améliorer la carte existante.

En conclusion, ce modèle reste une simulation ne reproduisant que partiellement une réalité complexe et les évènements possibles. Les résultats encourageants montrent de fortes chances à la généralisation de l'application de cette méthode à d'autres territoires. Il est donc nécessaire de réaliser d'autres expériences sur des sites différents

(géologie, topographie). La finesse des résultats est, bien évidemment, liée à la qualité des données disponibles et de l'état de l'art dans ce domaine. Toutefois, celle-ci devrait s'améliorer au fil du temps (géologie) et les progrès de la recherche scientifique permettront de développer de nouveaux modèles encore plus performants.

Enfin, ce genre de méthode ne sera jamais plus qu'un outil d'aide à la décision demandant en plus le regard critique et l'avis d'experts et de spécialistes.

7 Conclusion

Le modèle OLPAC est opérationnel. Il permet, grâce aux données météorologiques radar (MétéoSuisse), de suivre à la fois en temps réel l'évolution de l'instabilité des terrains de toute une région et de prévoir les instabilités générées par les pluies prédites, pour émettre un message d'alerte. Ce modèle intègre les données (géologiques) spécifiques à chaque région étudiée ce qui rend la prévision plus réaliste. Les résultats sont très encourageants, mais il convient de capitaliser ces travaux par la réalisation d'autres expériences dans des sites où le contexte géologique est différent.

Ce système s'adresse principalement aux autorités compétentes dans le domaine de la prévention et de la prévision des risques liés aux glissements de terrain spontanés et coulées boueuses associées. Dans le cadre plus large de la gestion intégrée des risques, le système OLPAC est une des réponses possibles dans le domaine de la génération d'alertes précoces destinées aux autorités (mesures de préparation).

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce à l'appui de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), du canton du Valais et de MétéoSuisse pour la mise à disposition des données radar.

Nous remercions le Dr. Bernard Loup (BAFU) pour ses multiples relectures et ses conseils avisés sur la rédaction de cet article, de même que le Dr. Raphaël Mayoraz, géologue cantonal, pour son soutien.

Bibliographie

Darcy, H. 1856: Les fontaines publiques de la ville de Dijon., V. Dalmont, Paris.

Estorge, J.L, Laborde, J.P. & Zumstein, J.F. 1980: Mise en évidence des relations entre le gradex des pluies journalières et les gradex des pluies de durées inférieures à 24h en Lorraine. La Météorologie, série VI (20–21).

Hernandez, M., Lebourg T. & Risser, V. 2008: LPC methodology as a tool to create real time cartography of the gravitational hazard: Application on the municipalities of Menton (Maritimes Alps, France). X International Symposium on Landslides, June, Xiang (China).

Jenson, S.K. & Domingue, S. 1988: Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. Vol. 54(11), p. 1593-1600.

Mualem, Y. 1976: A New model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. Water Resour. Res. 12(3), 513-522.

OFEV 2018. Carte de l'aléa ruissellement. OFEV, Berne. www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dangers-naturels/info-specialistes/situation-de-danger-et-utilisation-du-territoire/donnees-de-base-sur-les-dangers/alea-ruissellement.html

Risser, V. 2000 : Mouvements de terrains sur le versant oriental du volcan Rucu Pichincha (Quito, Equateur). Projet Sishilad – EMAAP-Q/INAMHI/IRD. 67 p.

Risser, V., Hernandez, M. & Assaba, M. 2007: Le développement d'une méthodologie et outils pour la cartographie probabiliste des aléas gravitaires: applications aux coulées boueuses et aux laves torrentielles du village d'Isola, vallée de la Tinée (06). In french. GIS CURARE (Groupement d'Intérêt Scientifique - Centre Universitaire de Réflexion pour la Création d'une Agence des Risques Environnementaux) report, 44p.

Skempton, A.W. 1957: Discussion: Further data on the c/p ratio in normally consolidated clays. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 7: 305–307.

Tarboton, D.G. 1997: A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. Water Resour Res, 33(2): p. 309-319.

Van Genuchten, M. T. 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892-898.