

# Méthode de caractérisation in situ des formations superficielles meubles et application à l'étude des coulées de boue

Séverine Boll-Bilgot<sup>1</sup> & Aurèle Parriaux<sup>2</sup>

## Resumé

La méthode GEOLEP tend à objectiviser la caractérisation des terrains concernés par l'instabilité gravifique des versants. Une des contributions consiste à déterminer des paramètres in situ par le géologue lors du levé de terrain. Des échantillons sont prélevés à l'aide d'une tarière à main ou sur des affleurements. Les échantillons sont analysés en utilisant un équipement de laboratoire simple et portable (tamis, tube à essai, bleu de méthylène, balance, colorimètre), soit directement sur le terrain, soit en fin de journée. La méthode livre essentiellement deux paramètres: la teneur en particules fines et l'indice de plasticité. Des tests ont été effectués sur plusieurs zones affectées par des coulées de boue. Ils montrent que ces paramètres contribuent à une meilleure caractérisation des terrains. Par exemple, grâce à la teneur en fines et l'usage des géotypes, on peut mieux estimer les contrastes de perméabilité entre le substratum et la couverture potentiellement instable, et donc une meilleure caractérisation des processus à attendre et de la dangerosité qu'ils représentent. L'indice de plasticité permet un meilleur pronostic sur la vitesse des coulées et leur étendue. Ce complément à la cartographie des dangers d'instabilité des versants se révèle rapide et peu coûteux. Grâce à une caractérisation factuelle des terrains, il contribue à renforcer la crédibilité des études d'instabilité, donc également leur acceptabilité, et à faciliter la mise en œuvre des mesures de mitigation.

## Zusammenfassung

Die GEOLEP-Methode dient zur besseren Charakterisierung des Untergrundes instabiler Hänge. Sie ermöglicht unter anderem die in situ-Bestimmung von Parametern während den Feldaufnahmen. Gesteinsproben können mittels Bohrstock oder direkt am Aufschluss gewonnen werden. Die Proben können mit einer einfachen, tragbaren Laborausstattung (Sieb, Reagenzglas, Methylenblau, Vergleichsskala, Kolorimeter) direkt im Feld oder nach der Feldarbeit analysiert werden. Die Analyse liefert im Wesentlichen zwei Parameter: Feinanteil und Plastizität der Probe. Untersuchungen wurden in mehreren Gebieten, in denen Hangmuren aufgetreten sind, gemacht. Diese zeigen, dass die bestimmten Parameter zu einer Verbesserung der Charakterisierung des Untergrundes beitragen. Zum Beispiel können, mithilfe des Gehaltes an Feinanteilen und der Bestimmung des Geotyps, Permeabilitätskontraste zwischen stabilem und potentiell instabilem Untergrund besser abgeschätzt werden. Dies ermöglicht eine bessere Charakterisierung möglicher Prozesse und der damit zusammenhängende Gefährdung. Der Plastizitätsindex ermöglicht eine verbesserte Prognose bezüglich Geschwindigkeit und Reichweite einer Hangmure. Die Methode stellt eine kostengünstige und schnelle Ergänzung zur Kartierung von Hangmuren-gefährdeten Bereichen dar. Die Erhebung von direkten Messdaten im Gelände hilft, die Glaubwürdigkeit und das Vertrauen in entsprechende Untersuchungen von gefährdeten Hangbereichen zu verbessern und erleichtert die Umsetzung entsprechender Massnahmen.

<sup>1</sup> CSD Ingenieure AG, Hessestrasse 27d, 3097 Liebefeld;  
s.boll@csd.ch

<sup>2</sup> EPFL, aurele.parriaux@epfl.ch

# 1 Introduction

Depuis de nombreuses années, le Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement de l'EPFL (GEOLEP) a développé des méthodes facilitant l'usage de la géologie dans le cadre de l'aménagement du territoire. C'est déjà l'introduction de la notion de «géotypes» qui a permis au Canton de Vaud de rédiger une carte géologique agrégée et homogène sur la vingtaine de feuilles au 1/25'000 concernées (Parriaux, A., Turberg, P., Lance, J.-M., & Giorgis, D. 2007, Parriaux, A., Turberg, P., Lance, J.-M., & Giorgis, D. 2015). Dans le domaine des dangers naturels, les géotypes ont été utilisés dans l'optique de définir dans le territoire des unités géologiques homogènes (UGH). Chaque unité géologique homogène est caractérisée par des propriétés géologiques qui sont utiles pour évaluer les risques d'instabilité des versants, notamment les glissements de terrain et les coulées de boue. Ces propriétés sont déterminées par le géologue sur le terrain de

manière simple et bon marché, en même temps qu'il cartographie les phénomènes. La méthode GEOLEP peut également être un outil précieux pour la caractérisation des versants sujets aux glissements superficiels et aux coulées de boue (analyse de la prédisposition) en étayant les réflexions du géologue grâce aux étapes suivantes (Fig. 1).

## Sondages à la tarière à main

Les sondages à la tarière à main permettent facilement d'accéder à la nature géologique de la couverture meuble sur un mètre environ, de déterminer une stratification, son épaisseur, la présence d'eau souterraine et de prendre des échantillons dans de bonnes conditions. Le nombre de sondages dépend de la complexité de la zone à étudier et bien entendu de l'enjeu et des risques encourus. La tarière à main permet aussi de procéder facilement à des profils comprenant des échantillons à différentes profondeurs.

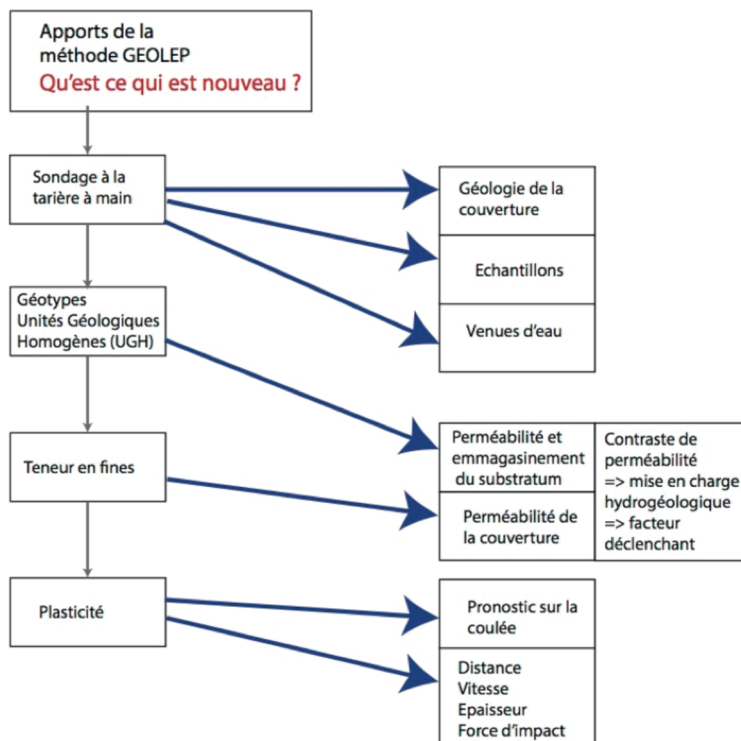


Fig. 1: Logigramme de la méthode GEOLEP.

## Identification des géotypes et des unités géologiques homogènes

Tant pour le substratum que pour la couverture, on cartographie la zone en termes de géotypes (Parriaux, A. et al 2007, Parriaux, A. et al 2015). Si nécessaire, on définit au sein d'un géotype différentes unités géologiques homogènes, notamment sur la base des échantillons collectés. Le géotype du substratum permet d'attribuer un ordre de grandeur de sa perméabilité ainsi qu'une estimation des volumes d'eau qui sont susceptibles d'alimenter une instabilité superficielle en cas de rupture de la couverture.

### Essais in situ

Une technique a été développée pour déterminer sur le terrain, de manière simple, deux facteurs importants dans la dynamique des glissements et des coulées: la teneur en fines du matériel et sa plasticité. La teneur en fines permet d'estimer la perméabilité de la couverture. Par comparaison avec la perméabilité du substratum, le contraste de perméabilité peut être évalué et le risque de mise en charge hydrogéologique sous la couverture (Fig. 2), facteur déclenchant prépondérant dans ce genre de phénomène, en être déduit.

La plasticité donne des indications sur le mode de rupture et de fluage du glissement ou de la coulée. Une haute plasticité caractérisera une rupture pas trop brutale, une

vitesse modérée ainsi qu'une extension également modérée. Au contraire, une plasticité faible donnera lieu à des ruptures soudaines, avec des grandes vitesses de propagation et une extension importante vers l'aval, ceci d'autant plus si le coefficient d'emmagasinement du substratum est élevé.

Suite aux travaux de Pouyt (2004) et de Pantet, A., Parriaux, A. & Thelin, P. (2007), la méthode pour quantifier ces deux paramètres au cours d'une campagne de terrain a été finalement mise au point et optimisée (Bilgot, S. & Parriaux, A. 2009). Le choix de la densité d'échantillonnage pour l'obtention des valeurs de teneur en fines et de plasticité joue ainsi un rôle prépondérant: si l'on peut se contenter de ne prélever que quelques échantillons dans une zone visiblement homogène, il est utile en revanche de procéder à de nouveaux tests en cas de changement visible ou supposé des propriétés des formations: le nombre de tests à effectuer ne sera donc pas fonction de la taille de la zone à investiguer mais plutôt de sa variabilité.

## 2 Principe de l'essai de caractérisation in situ

L'essai de caractérisation in situ des formations superficielles meubles vise à obtenir d'une part des informations sur leur granu-

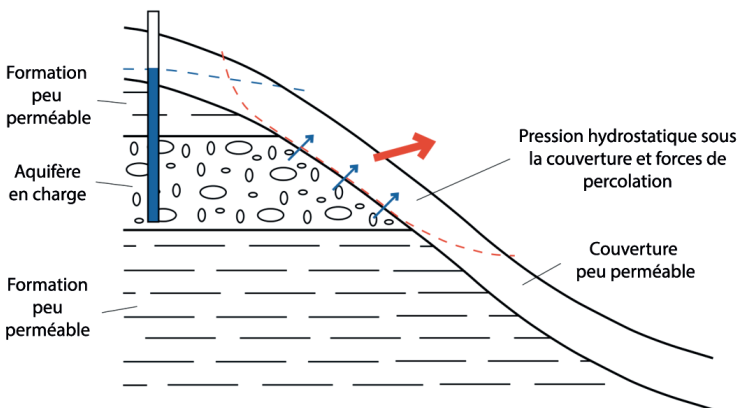


Fig. 2: Effet du contraste de perméabilité entre le substratum et la couverture.

lométrie et d'autre part une évaluation de leur argilosité.

## 2.1 Granulométrie

L'importance relative des différentes fractions granulométriques est calculée par le biais d'un essai de sédimentométrie simplifié proche de la méthode d'Andreasen ; il consiste à mesurer le volume de matériel sédimenté au fond d'une éprouvette à des intervalles de temps déterminés. Ceux-ci sont définis au moyen de la loi de Stokes et sont fonctions de la classe granulométrique considérée ainsi que de la géométrie de l'éprouvette utilisée pour le test:

$$t = \frac{36 \times \eta \times h}{2 \times d^2 \times g \times (\rho_p - \rho_f)}$$

Avec

$t$  : temps au bout duquel les particules de diamètre supérieur ou égal à  $d$  auront sédimenté [s];

$\eta$  : viscosité dynamique du fluide [kg/m.s] ; pour l'eau:  $\eta = 1.10^{-3}$  kg/m.s;

$h$  : hauteur de chute de la particule [m]; on considèrera la distance entre le fond de l'éprouvette et la surface du liquide dans celle-ci;

$d$  : diamètre de la particule [m];

$g$  : accélération de la pesanteur, soit 9.81 m<sup>2</sup>/s;

$\rho_p$  : masse volumique de la particule [kg/m<sup>3</sup>]; on considèrera par défaut une masse volumique de 2'670 kg/m<sup>3</sup>;

$\rho_f$  : masse volumique du fluide [kg/m<sup>3</sup>]; pour l'eau,  $\rho_f = 1'000$  kg/m<sup>3</sup>.

## 2.2 Argilosité

L'argilosité d'une formation meuble est un bon indicateur du comportement de celle-ci en fonction de sa teneur en eau. Elle est traditionnellement renseignée grâce à la détermination en laboratoire des limites d'Atterberg et de l'indice de plasticité ou encore par un essai d'absorption du bleu de méthylène.

Beaulieu 1979 et Pantet et al. (2007) ont montré qu'il existe une corrélation entre la valeur de bleu de méthylène et la limite de liquidité ainsi que l'indice de plasticité des formations argileuses; l'essai de terrain utilisé dans le cadre du test présenté ici consiste ainsi à introduire un échantillon de masse connue dans une solution de bleu de méthylène et de mesurer la masse de bleu adsorbée par celui-ci. Les équations suivantes ont été retenues:

$$IP = \frac{(0,042 \times VB^2) + (0,16 * VB)}{100}$$

$$w_L = \frac{(17,8 \times VB) + 6}{100}$$

Avec

$IP$  : indice de plasticité [-] ;

$w_L$  : limite de liquidité [-];

$VB$  : valeur de bleu, correspondant à la masse de bleu de méthylène adsorbée par kilogramme de matériaux de granulométrie inférieure ou égale à 2 millimètres [g/kg].

## 3 Méthode

### 3.1 Déroulement de l'essai

Les proportions des différentes fractions granulométriques ainsi que la valeur de bleu de méthylène peuvent être déterminées sur le terrain par le biais d'un essai mis au point par le laboratoire GEOLEP de l'EPFL, en environ 15 minutes par échantillon. Le déroulement de l'essai est détaillé en Annexe 1. Le protocole, les valeurs numériques ainsi que les équations ci-dessous ne sont valables qu'en relation avec le matériel préconisé pour cet essai (cf. Annexe 1); l'utilisation d'autres outils nécessite une adaptation des formules.

Un outil de calcul et de visualisation en ligne de ces valeurs a par ailleurs été développé,

permettant de consulter les résultats sur le terrain et ainsi d'optimiser la prise d'échantillons: on peut ainsi densifier les mesures dans les zones de forte hétérogénéité ou au contraire les espacer là où les paramètres varient peu.

### 3.2 Sources d'erreur

Les résultats obtenus par les essais de caractérisation in situ peuvent présenter des erreurs dues aux propriétés des matériaux échantillonnés:

- Dans le cas d'échantillons riches en argiles et présentant une faible teneur en eau, il est possible que des particules fines restent collées sur des sables ou agrégées entre elles; les fractions granulométriques les plus grossières sont alors surestimées aux dépens de la fraction des limons fins et argiles; les échantillons testés présentent alors des IP non négligeables malgré des teneurs en argiles nulles; cela peut être évité en incorporant suffisamment d'eau à l'échantillon ainsi qu'en agitant plus longtemps et fortement le tube;
- Dans le cas d'échantillons riches en matière organique, celle-ci aura tendance à adsorber le bleu de méthylène: la valeur de bleu et donc la limite de liquidité et l'indice de plasticité sont ainsi artificiellement surestimés; on peut s'attendre à ce cas de figure lorsque l'on observe des éléments flottants à la surface du liquide dans les tubes; cela peut être évité en prélevant les échantillons suffisamment en profondeur (au-delà de 50 cm) et en enlevant le plus d'éléments organiques possibles lors du tamisage.

## 4 Application à l'analyse des coulées de boue

La méthode GEOLEP a pu être utilisée dans le cadre d'un mandat de l'Office fédéral de

l'environnement (OFEV) attribué au Groupe de travail «Danger naturel et Géologie» (DNG/AGN – GSGI/SFIG). En plus des critères définis par la méthode AGN 2004 et repris dans l'aide à l'exécution de l'OFEV (2016), la granulométrie et l'argilosité ont été prises en compte dans le cadre de l'étude de neuf sites répartis du Jura à la Suisse Orientale (Wyss, R., Gruner, U. & Liniger, M. 2018). Les résultats obtenus pour deux sites sont présentés ci-dessous de façon détaillée.

### 4.1 Les Avants

Le site d'étude des Avants est situé dans les Préalpes vaudoises, à environ deux kilomètres au Nord-Est de Montreux (Fig. 3). Le substratum est composé de calcaires du Lias présentant une karstification peu développée mais une forte fracturation ainsi que des interlits marneux. Ils sont recouverts de lambeaux de moraine de fond rhodanienne ainsi que de colluvions (Fig. 5).

Ce site est fréquemment affecté par des coulées de boue de versant. De nombreuses niches d'arrachement y sont visibles, bien qu'en grande partie végétalisées, et des événements ayant eu lieu en 1911, 1957 et 2007

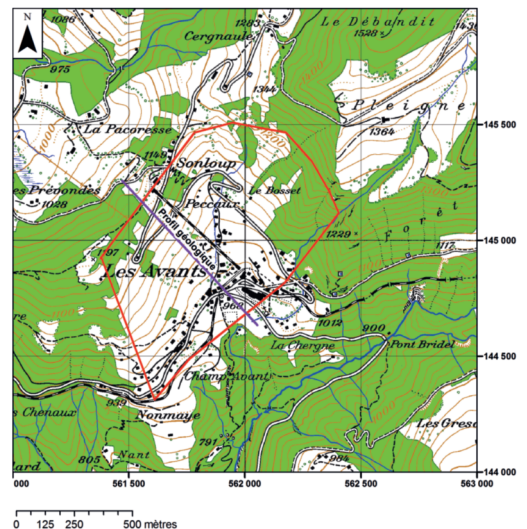


Fig. 3: Localisation de la zone d'étude et du profil géologique.



Fig. 4: Coulées initiées en juin 2007, huit jours après l'événement.

(Fig. 4) ont pu être documentés. Affectant les formations morainiques sur des épaisseurs allant de quelques dizaines de centimètres à un mètre (jusqu'à trois mètres pour l'événement de 1911), ils ont localement mis à nu les calcaires sous-jacents. Ces événements se sont tous déroulés après de longues périodes de fortes pluies.

La cause probable de l'occurrence de tels phénomènes dans ce versant est la présence d'une formation rocheuse perméable (avec une forte hétérogénéité de perméabilité), recouverte de faibles épaisseurs de matériaux peu perméables: suite à de fortes pluies, l'aquifère sous-jacent se met en charge et l'eau ne peut s'évacuer facilement, bloquée par la couverture (Figure 5). La pression sous celle-ci va ainsi augmenter jusqu'à ce que la couverture cède sous la forme d'une coulée de boue.

#### 4.1.1 Investigations in situ

Seize échantillons ont été prélevés dans la zone d'étude, à une profondeur moyenne de 45 cm. Deux catégories ont pu être distinguées:

- Au Sud du funiculaire, des matériaux d'origine morainique riches en limons et argiles et de plasticité comprise entre 5 et 10%; ils présentent une cohésion non négligeable et leur perméabilité est faible;

- Au Nord du funiculaire ainsi qu'à proximité des crêtes, des dépôts de pentes (éboulis et colluvions) beaucoup plus sableux, très peu cohésifs, dont la plasticité n'excède pas les 5%; leur perméabilité est quant à elle plus élevée.

Le mode de prélèvement des échantillons à la tarière a montré que le substratum est globalement très proche de la surface au Sud du funiculaire, le plus souvent à moins d'un mètre de profondeur. Des forages géother-

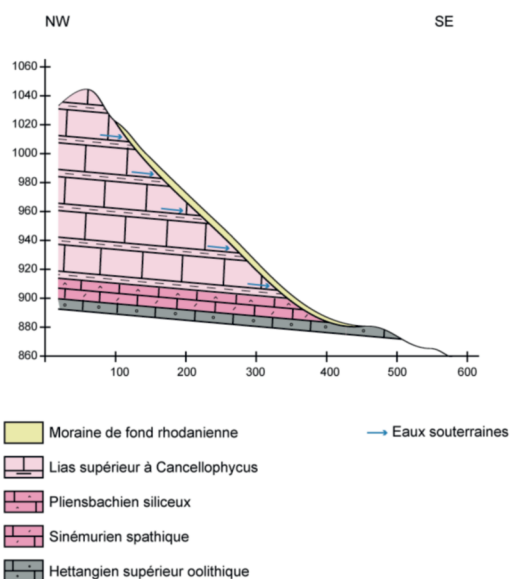


Fig. 5: Coupe géologique schématique du versant des Avants.

miques et géotechniques montrent que les dépôts de pentes atteignent en revanche plusieurs mètres d'épaisseur au Nord de celui-ci.

#### 4.1.2 Résultats et interprétation

Les essais in situ ont montré une bonne corrélation entre la présence de matériaux riches en fines (plus de 50% de limons et argiles) de plasticité supérieure à 5%, cohésifs et peu perméables, et la présence de coulées de boue de versant. Les zones présentant des granulométries plus grossières et de plasticité plus faibles (inférieure à 5%, moins cohésives et plus perméables), ne sont ici au contraire pas touchées par ces phénomènes.

On peut aussi voir une relation entre les zones présentant de faibles épaisseurs de couverture et l'occurrence de coulées de boue (cf. Fig. 6).

Ces observations tendent à confirmer que la présence de coulées de boue est ici bien liée à une augmentation de la pression de pores à l'interface entre le substratum et les formations superficielles. En effet, la forte teneur en limons et argiles implique une faible perméabilité des formations superficielles: celle-ci étant de plus d'épaisseur non

négligeable, l'eau ne peut alors pas s'évacuer facilement en cas de mise en charge de l'aquifère sous-jacent.

Ainsi, il serait possible d'exclure des zones de dangers les zones présentant de trop fortes épaisseurs de matériaux meubles (>80 cm) ainsi que celles présentant des plasticités faibles (<5%): cela permettrait par exemple de ne plus considérer la partie Est du site d'études comme dangereux en ce qui concerne les coulées de boue.

#### 4.2 Eltschingera

Le site d'étude d'Eltschingera est situé dans les Préalpes fribourgeoises, à environ trois kilomètres en aval du Schwarzsee, au cœur des flyschs du Gurnigel (Fig. 7). Le substratum est composé d'une alternance de grès fracturés et de bancs de marnes. S'ils peuvent localement être recouverts de lambeaux de moraine, la majeure partie des formations visibles en surface est composée de dépôts de pente (éboulis et colluvions) de flyschs altérés et de masses glissées (Fig. 8). Le site d'Eltschingera a été à plusieurs reprises affecté par des coulées de boue de versant. De nombreuses niches d'arrachement sont visibles dans le versant, la plupart

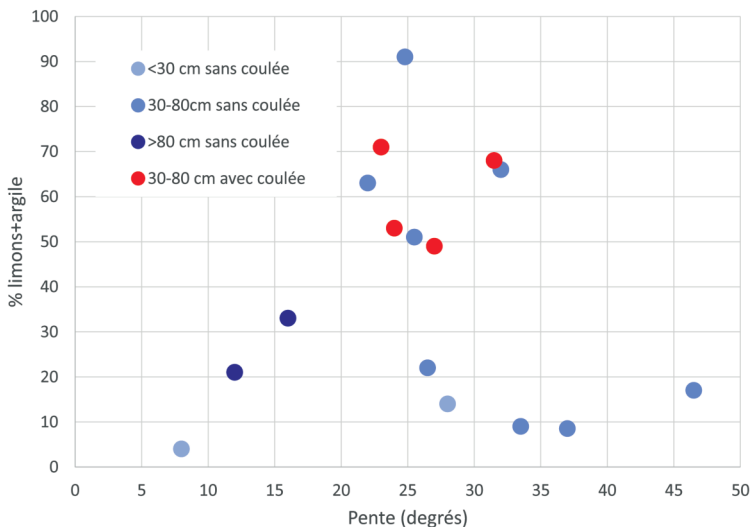


Fig. 6: Corrélation entre granulométrie, épaisseur des formations superficielles, pente du versant et occurrence de coulées de boue (zone instable).

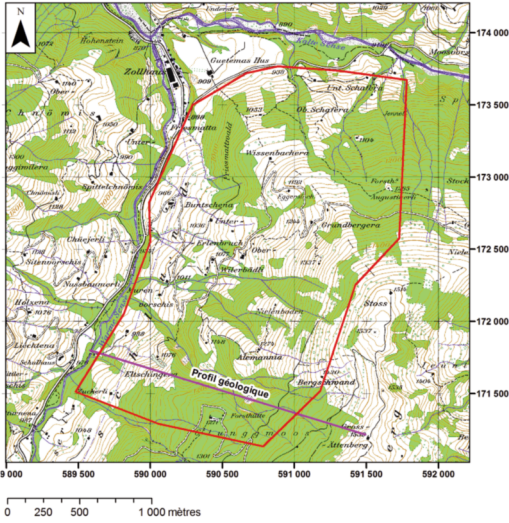


Fig. 7: Localisation de la zone d'étude et du profil géologique.

végétalisées (amont du chalet 1078 m situé en haut du cirque), d'autres toujours actives et laissant affleurer les bancs de grès sous-jacents (Fig. 8). Les événements de 2005, faisant suite à de fortes précipitations, ont pu être bien documentés: deux coulées d'environ 400 m<sup>3</sup> s'étaient alors produites dans la partie amont du secteur, détruisant un pâturage et menaçant le chalet 1078 m.

La cause probable de l'occurrence de ce phénomène est la mise en charge de l'aquifère des grès fracturés recouvert d'une faible épaisseur (quelques dizaines de cm) de flysch altérés très peu perméables (Fig. 9). La concentration d'écoulements de surface

et leur infiltration préférentielle a également pu jouer un rôle dans le déclenchement de la coulée.

#### 4.2.1 Investigations in situ

Dix-huit échantillons ont été prélevés dans la zone d'étude, à une profondeur comprise entre 30 et 80 centimètres, correspondant la plupart du temps à la profondeur du substratum schisto-gréseux. Ces formations étaient à dominante argilo-limoneuse, présentant dans l'ensemble de très fortes plasticités (de 20 à 35%). Trois contextes ont pu être distingués:

- Dans le cirque d'Eltschingera ainsi qu'au nord de Wissenbachera, une couverture superficielle de maximum 50 cm d'épaisseur composée de flyschs altérés;
- Entre Eltschingera et Wissenbachera, une couverture superficielle d'épaisseur variable (de quelques cm à plus d'un mètre) composée d'éboulis pris dans une matrice également très plastique;
- A l'amont de Wissenbachera, plus d'un mètre d'épaisseur de flyschs altérés extrêmement plastiques.

#### 4.2.2 Résultats et interprétation

Les essais in situ montrent que la couvertu-



Fig. 8: Coulées initiées en 2005 (Photo: B. Loup).



re est partout caractérisée par une forte concentration en fines et une plasticité élevée. C'est donc une situation propice à de fortes mises en charges des aquifères gréseux. On peut également s'attendre à des coulées assez plastiques qui ne devraient pas se propager sur de grandes distances dans le versant. La séparation entre zone plus ou moins exposées au déclenchement d'instabilité superficielles doit faire appel aux autres critères géologiques classiques, soit l'épaisseur de la couverture ou encore la présence d'exutoires d'eau souterraine.

Il est intéressant de noter que les coulées se concentrent dans les zones où les trois conditions suivantes sont réunies (Fig. 10):

- Faible épaisseur de couverture (30 à 80 cm);
- Pente marquée (23 à 33°);
- Forte teneur en limons et argiles (>70%).

Il est probable que, dans ce cas, l'association entre ces différents paramètres soit la clé de la prédisposition aux coulées de boue, une épaisseur trop importante de couverture pouvant empêcher le déclenchement de celles-ci et plutôt être la cause de glissements permanents. Une prédisposi-

tion moins marquée pourrait ainsi être attribuée, outre aux zones de faible pente, à celles présentant des épaisseurs non négligeables de formations meubles (pour lesquelles le substratum ne serait pas atteignable à la tarière).

On ne peut pas exclure non plus la présence de différences au niveau du substratum, la forte hétérogénéité de celui-ci pouvant être la cause de venues d'eau plus importantes ou plus brutales et ponctuelles en certains points du versant.

## 5 Valorisation des résultats

Les deux exemples ci-dessus montrent que les paramètres d'argilosité et de granulométrie, s'ils ne permettent évidemment pas à eux seuls de mettre en évidence une prédisposition aux coulées de boue, apportent des données factuelles complémentaires sur les terrains concernés, utiles à la compréhension des processus d'instabilité. Ils doivent être combinés avec les autres critères géologiques, hydrogéologiques et morphologiques classiques tels que la pente et l'épaisseur des formations.

Ces caractéristiques supplémentaires peu-

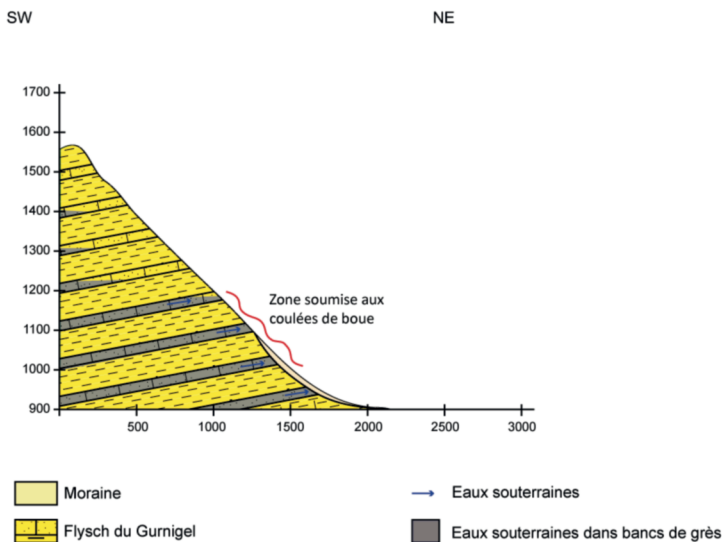


Fig. 9: Coupe géologique schématique du versant d'Elt-schingera.

vent également permettre d'aller plus loin dans l'étude du versant en servant de base à une première estimation de paramètres hydrodynamiques et géotechniques pouvant être utilisés dans le cadre de modélisations. Trois contributions à l'analyse du danger sont présentées ci-dessous.

### 5.1 Contraste de perméabilité et disposition aux coulées de boue

L'un des facteurs pouvant aggraver la prédisposition aux coulées de boue est la présence d'un contraste de perméabilité entre le substratum et les formations superficielles. C'est en particulier le cas lorsque des calcaires karstifiés ou des roches fissurées sont recouverts d'une faible épaisseur de moraine de fond ou de colluvions: lors d'une forte mise en charge des fissures, l'eau reste bloquée sous la couverture; si la pression est suffisamment élevée, la couverture est déstabilisée par la poussée d'Archimède, donnant lieu à la libération brutale de l'eau et au déclenchement de la coulée de boue (voir Fig. 2).

Des essais d'infiltration de type Porchet ont permis de mettre en évidence une corrélation entre la conductivité hydraulique à saturation des formations meubles et leur teneur en limons et argiles. En permettant d'identi-

fier les zones présentant des perméabilités basses en surface et en ayant une connaissance suffisante des propriétés hydrogéologiques du substratum rocheux, on peut mettre en évidence des zones plus sensibles aux phénomènes de coulées de boue.

De manière générale, à l'échelle de tous les sites étudiés dans le cadre du mandat de l'OFEV (Wyss et al. 2018), on constate, que la teneur en fines est, dans la grande majorité des cas, plus élevée dans les échantillons prélevés dans les zones instables (figure 11). Cela confirme le rôle des fines dans le contraste de perméabilité et la susceptibilité à engendrer des coulées de boue.

### 5.2 Plasticité et extension des coulées de boue

L'extension des coulées de boue dépend de plusieurs facteurs, notamment:

- La quantité d'eau qui va se libérer par l'aquifère en charge et qui va fluidifier la coulée
- La plasticité du matériel composant la coulée
- La pente du terrain en aval de la niche d'arrachement
- La nature et la saturation du substrat sur lequel la coulée se propage.

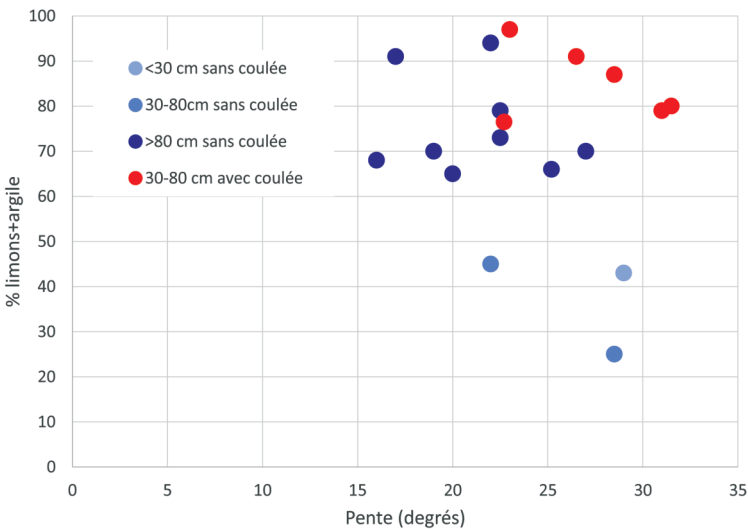


Fig. 10: Eltschingera: Corrélation entre granulométrie, épaisseur des formations superficielles, pente du versant et occurrence de coulées de boue.

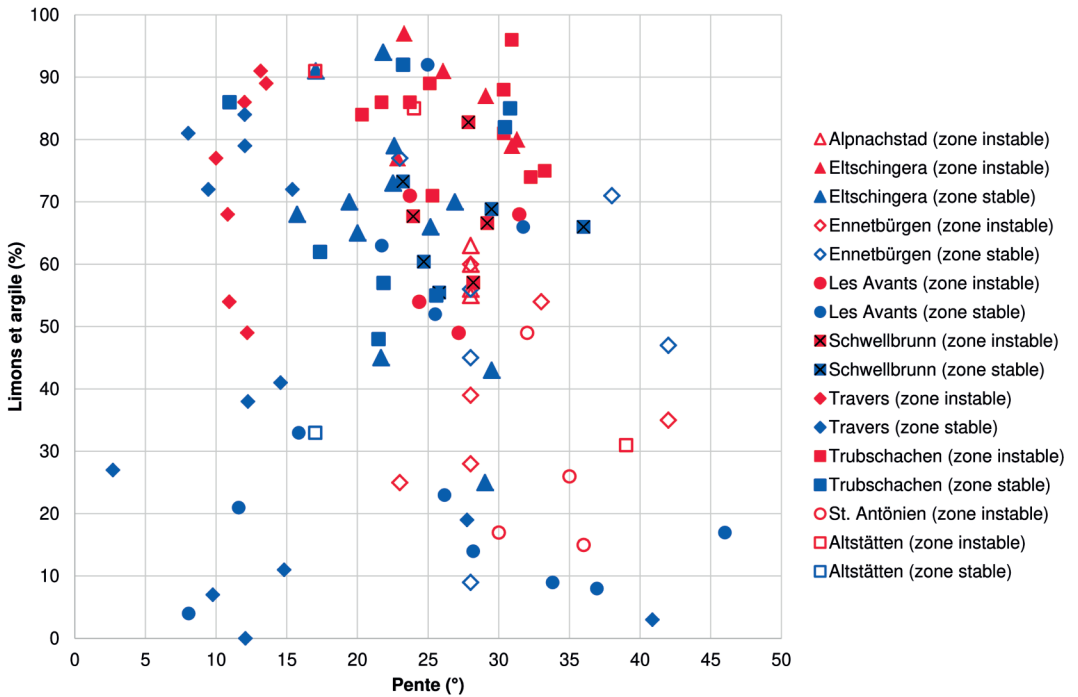


Fig. 11: Synthèse des mesures sur les sites étudiés. En rouge, les échantillons prélevés dans les zones instables. En bleu, ceux des zones stables. D'après Wyss et al. 2018.

La méthode GEOLEP apporte des informations sur les deux premiers points:

- Quantité d'eau: par la caractérisation en géotypes du substratum, on peut estimer la perméabilité et le coefficient d'emménagement du substratum
- Plasticité: les déterminations in situ de l'indice de plasticité décrivent un comportement plutôt plastique ou plutôt liquide.

Pour les sites-tests étudiés dans le cadre du mandat de l'OFEV (Wyss et al. 2018), il n'a pas été possible de faire une étude systématique de la relation plasticité - longueur de la coulée par manque de ressources. Il ressort toutefois que les sites où la plasticité est élevée donnent lieu à des coulées de boue de relativement faible extension (par exemple Eltschingera). Au contraire, on constate tendanciellement de plus grandes extensions dans plusieurs sites où la plasticité est faible. Le site de St. Antonien en est un exemple parlant (Fig. 12).

Les trois échantillons prélevés dans la zone source morainique possèdent un indice de

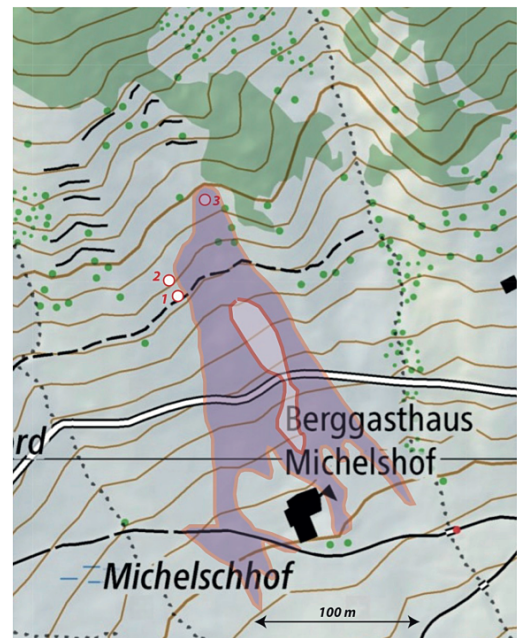


Fig. 12: Coulées de boue à St. Antonien en 2005 (mauve). Cercles rouges: points de prélèvement.

plasticité entre 3 et 6% (Fig. 13). La coulée la plus longue atteint 250 m de longueur.

### 5.3 Modélisation de l'intensité des coulées de boue

L'intensité des coulées de boue, et en particulier son énergie et l'épaisseur des dépôts, peuvent être évalués grâce à des logiciels de modélisation pour lesquels on doit connaître les propriétés des matériaux, en particulier leur viscosité et leur cohésion. Ces paramètres peuvent être déterminés en laboratoire, ou encore en procédant à une calibration durant la modélisation, ce procédé itératif pouvant être long à effectuer.

La connaissance de la valeur de bleu de

méthylène et de la granulométrie peut nous permettre de faciliter ce processus. Des corrélations peuvent en effet être mises en évidence entre teneur en fines et  $I_p$  d'une part, et la cohésion effective des matériaux testés d'autre part (Fig. 14). De plus, des formations très plastiques auront tendance à présenter une moindre liquéfaction et donc des distances de propagation plus faibles que des matériaux non cohésifs.

Il est à noter que ces corrélations doivent être définies ou vérifiées pour chaque grand type de formation en présence: des dépôts de pente non consolidés n'ont en effet pas les mêmes propriétés géotechniques qu'une moraine de fond alors que leur granulométrie peut être similaire; le recours à une

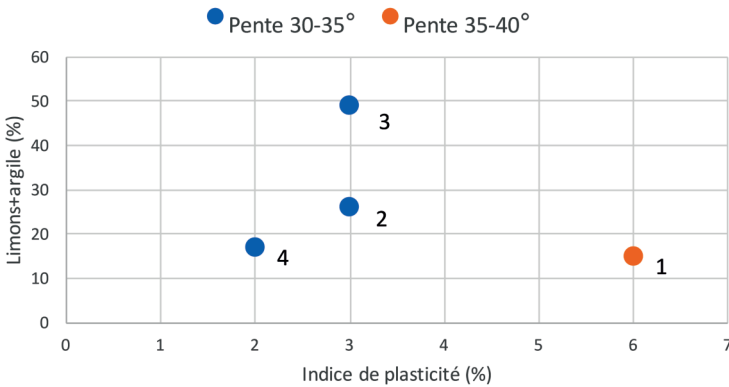


Fig. 13: Graphique Indice de plasticité – teneur en fines dans la zone source de St. Antonien. Situation: voir figure 12. Le point no 4 concerne une autre coulée de boue un peu plus bas dans le versant.

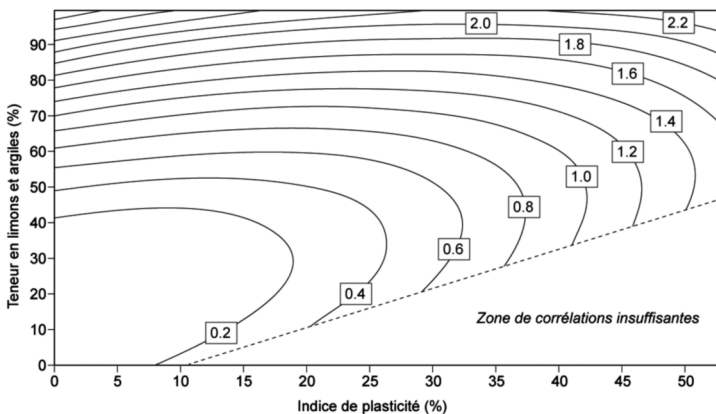


Fig. 14: Cohésion effective (kPa) à saturation en fonction de la granulométrie et de l'indice de plasticité des formations superficielles meubles, cas de matériaux d'origine morainiques (Bilgot & Parriaux, 2011).

caractérisation géologique additionnelle décrivant le milieu de formation, comme les géotypes, est alors indispensable.

Pour les matériaux de cohésion non nulle, ce qui concerne la plupart des formations contenant une fraction même minime d'argile, ce paramètre joue un rôle très important dans la modélisation: des tests effectués avec le logiciel RAMMS::Hillslope (<http://ramms.slf.ch/ramms/index.php>; Bartelt P., Buehler Y., Christen M., Deubelbeiss Y., Graf C. & McArdell B. W. 2011) sur les sites des

Avants (Table 1) et d'Eltschingera (Table 2) ont en effet montré que les énergies maximales simulées devenaient peu sensibles aux variations de  $\mu$  et de  $\xi$  à partir du moment où l'on tenait compte d'une cohésion non nulle en accord avec les conditions du terrain (0.3 kPa pour les Avants, 1.7 kPa pour Eltschingera). Par ailleurs, des variations de cohésion au sein d'un même ordre de grandeur n'avaient pas non plus d'impact important dans le calcul des énergies maximales. Ces tendances semblent se vérifier d'autant plus que les cohésions utilisées sont élevées.

	c' (kPa)	$\mu$ (-)	$\xi$ (m/s <sup>2</sup> )	v max (m/s)	h max (m)	P max (kPa)	Erreur relative (P max)
<b>Référence</b>	<b>0.3</b>	<b>0.6</b>	<b>400</b>	<b>2.0</b>	<b>0.5</b>	<b>8.4</b>	<b>0 %</b>
<b>En faisant varier <math>\xi</math></b>	0.3	0.6	200	2.0	0.5	8.6	2 %
	0.3	0.6	600	2.0	0.5	8.1	4 %
<b>En faisant varier <math>\mu</math></b>	0.3	0.5	400	2.4	0.5	9.2	10 %
	0.3	0.7	400	1.9	0.5	7.6	10 %
<b>En faisant varier c'</b>	0.2	0.6	200	2.0	0.5	8.5	1 %
	0.2	0.6	400	2.0	0.5	8.9	6 %
	0.2	0.6	600	2.0	0.5	8.8	5 %
	0.4	0.6	200	2.0	0.5	8.9	6 %
	0.4	0.6	400	2.0	0.5	8.8	5 %
	0.4	0.6	600	2.0	0.5	9.2	10 %
<b>Avec c' = 0 kPa</b>							
<b>En faisant varier <math>\xi</math></b>	0	0.6	200	2.0	0.5	6.8	19 %
	0	0.6	400	2.0	0.5	9.4	12 %
	0	0.6	600	2.0	0.5	10.4	24 %
<b>En faisant varier <math>\mu</math></b>	0	0.5	600	2.3	0.5	11.7	39 %
	0	0.7	600	1.9	0.5	6.7	20 %

Tab. 1: Aperçu des modélisations effectuées sur le site des Avants.

	c' (kPa)	$\mu$ (-)	$\xi$ (m/s <sup>2</sup> )	v max (m/s)	h max (m)	P max (kPa)	Erreur relative (P max)
<b>Référence</b>	<b>1.7</b>	<b>0.7</b>	<b>400</b>	<b>2.4</b>	<b>0.9</b>	<b>11.6</b>	<b>0 %</b>
<b>En faisant varier <math>\xi</math></b>	1.7	0.7	200	2.4	0.9	11.5	1 %
	1.7	0.7	600	2.4	0.9	12.0	3 %
<b>En faisant varier <math>\mu</math></b>	1.7	0.6	400	2.6	1.0	12.1	4 %
	1.7	0.8	400	2.4	0.9	11.7	1 %
<b>En faisant varier c'</b>	1.5	0.7	200	2.4	0.9	11.5	1 %
	1.5	0.7	400	2.4	0.9	11.7	1 %
	1.5	0.7	600	2.5	0.9	12.0	3 %
	2	0.7	200	2.4	0.9	11.5	1 %
	2	0.7	400	2.4	0.9	11.6	0 %
	2	0.7	600	2.4	0.9	11.8	2 %
<b>Avec c' = 0 kPa</b>							
<b>En faisant varier <math>\xi</math></b>	0	0.7	200	2.0	1.0	12.3	6 %
	0	0.7	400	2.8	1.0	16.5	42 %
	0	0.7	600	3.0	1.0	19.0	64 %
<b>En faisant varier <math>\mu</math></b>	0	0.6	600	3.9	1.0	29.7	156 %
	0	0.8	600	2.6	0.9	13.5	16 %

Tab. 2: Aperçu des modélisations effectuées sur le site d'Eltschingera.

En utilisant la valeur en pourcents de la pente moyenne dans la zone de propagation pour le coefficient de frottement de Coulomb  $\mu$ , une valeur de 400 m/s<sup>2</sup> pour le coefficient de frottement visco-turbulent  $\xi$  et une cohésion basée sur les résultats des essais in situ, il a été possible pour ces deux sites d'obtenir directement des distances de propagation réalistes pour les deux sites étudiés, sans passer par une fastidieuse phase de calibration. Ces premiers résultats s'étant avérés prometteurs, il serait intéressant de réaliser des tests similaires sur d'autres sites d'études.

## 6 Synthèse et Recommandations

En permettant d'intégrer des données factuelles acquises sur le terrain quant à la nature et la géométrie des formations meubles (notamment leur granulométrie et leur argilosité), la méthode GEOLEP fournit à moindre frais au géologue des indications quantitatives l'aidant à mieux comprendre le fonctionnement des instabilités de versant. Par conséquent elle contribue à objectiviser la cartographie des dangers. Elle peut servir de base à de premières modélisations et peuvent s'avérer ainsi un outil précieux d'aide à la décision dans le cadre d'études préliminaires ou lors d'évaluations en situation d'urgence. La méthode doit être appliquée dans le cadre d'une reconnaissance géologique, hydrogéologique et morphologique complète. Les essais in situ ne remplacent pas des essais en laboratoire mais permettent d'en diminuer le nombre et leur coût. Ces derniers interviennent du reste surtout dans le cadre d'études de détail avec des sondages carottés. La tarière à main permet de prélever facilement les échantillons nécessaires pour les essais in situ mais donne aussi de précieuses informations sur la nature et la structure de la couverture meuble, sur la profondeur du substratum si celui-ci est assez superficiel.

La méthode GEOLEP est un outil dont les résultats doivent être critiqués ou modulés par le géologue en fonction de sa connaissance locale. En particulier, les corrélations entre perméabilité, cohésion, indice de plasticité et teneurs en fines doivent être étalonnées par régions et/ou types de formation. De même les propriétés du géotype du substratum doivent être adaptées aux connaissances locales.

L'utilisation systématique de cette méthode, parallèlement aux approches conventionnelles, devrait permettre d'obtenir aisément une vaste base de données des caractéristiques des versants, d'une grande utilité pour l'étude systématique des glissements et des coulées de boue.

## Bibliographie

- AGN 2004: Gefahreinstufung Rutschungen i. w. S. – Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren – Entwurf. Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren, Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie SFIG-GSGI; im Auftrag des (ehem.) Bundesamtes für Wasser und Geologie.
- Bartelt P., Buehler Y., Christen M., Deubelbeiss Y., Graf C. & McArdeall B. W. 2011: RAMMS – A modelling system for debris flows in research and practice - User Manuel v.1.01 / Hillslope debris flow. WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF: 91 p.
- Beaulieu, J. 1979: Identification géotechnique de matériaux argileux naturels par la mesure de leur surface au moyen du bleu de méthylène. Thèse de doctorat de 3ème cycle. Université de Paris-Sud, Orsay.
- Bilgot S., & Parriaux, A. 2009: Using geotypes for landslide hazard assessment and mapping: a coupled field and GIS-based method. In A. Richter, editor, Geophysical Research Abstracts, volume 11. Copernicus GmbH.
- Bilgot, S. & Parriaux, A. 2011: Coupling 3D GIS-based modelling and field methods to evaluate landslide hazard predisposition. EGU General Assembly. Vienna: Geophysical Research Abstracts.
- OFEV 2016: Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1608: 98 p.
- Pantet, A., Parriaux, A. & Thelin, P. 2007: New method for in situ characterization of loose material for landslide mapping purpose, p. 166–179.
- Parriaux, A., Turberg, P., Lance, J.-M., & Giorgis, D. 2007: La méthode des géotypes pour le microzonage sismique. Tracés - Bulletin technique de la suisse romande, 15/16, S. 19–24.
- Parriaux, A., Turberg, P., Lance, J.-M., & Giorgis, D. 2015: Geotypen: Ein neues Konzept, welches die geologische Information für die Raumplanung optimiert. Swiss Bull. angew. Geol. 20/1, p. 47–60.
- Pouyt, M. 2004: Développement et test d'identification de terrain dans le domaine des instabilités de versant. Travail de diplôme pour l'obtention du titre d'ingénieur géologue, Université de Lausanne.
- Wyss, R; Gruner, U; Liniger, M. 2018: Verbesserung der Hangmurenbeurteilung. Swiss Bull. angew. Geol. 23/1, 2018. p. 57-71.

## Annexe 1: Description de l'essai de caractérisation in Situ

Tarière à main
Tamis maille 2 mm
Eau déminéralisée
Bleu de méthylène (10 g/litre)
Tubes à centrifuger gradués 15 ml
Balance de poche
Seringue 100 ml
Photomètre
Chronomètre
Pointes à filtre 100 µl
Micropipette
Seringue 20 ml
Pots 1dl refermables

- Prélever un échantillon dans les formations superficielles meubles, si possible suffisamment en profondeur pour éviter la présence de matière organique.
- Tamiser cet échantillon à 2 mm et y ajouter de l'eau jusqu'à ce que sa consistance soit pâteuse.
- Mettre environ 1 cm<sup>3</sup> d'échantillon tamisé dans un tube contenant 10 ml de solution de bleu de méthylène à 10 g/l.
- Mesurer  $m_{Bf}$  (masse du tube, de son contenu en bleu de méthylène et de l'échantillon introduit, [g]).
- Mesurer  $v_{Bf}$  (volume occupé par le bleu de méthylène et l'échantillon dans le tube, [ml]).
- Agiter fortement le tube.
- Laisser reposer la solution pendant 5 minutes.
- Pendant ce temps, mettre environ 2 cm<sup>3</sup> d'échantillon tamisé dans un tube contenant 5 ml d'eau désionisée.
- Mesurer  $m_{Vf}$  (masse du tube, de son contenu en eau désionisée et de l'échantillon introduit, [g]).
- Mesurer  $v_{Vf}$  (volume occupé par l'eau désionisée et l'échantillon dans le tube, [ml]).
- Compléter avec de l'eau déminéralisée jusqu'à 14 ml.
- Agiter jusqu'à ce que les agrégats aient disparu.
- Mesurer:
  - le volume sédimenté  $V_{Sm+g}$  à  $t_1 = 2''$  (sables moyens et grossiers, [ml])
  - le volume sédimenté  $V_{Sf}$  à  $t_2 = 10''$  (sables fins, [ml]);
  - le volume sédimenté  $V_{Lg}$  à  $t_3 = 1'$  (limons grossiers, [ml]);
- Mesurer le volume sédimenté  $V_{Lm}$  à  $t_4 = 4'$  (limons moyens, [ml]).
- Mettre 1 dl d'eau désionisée dans un pot.
- Prélever 100 µl de solution dans le tube contenant le bleu de méthylène avec une pointe filtrante.
- Les déposer dans le pot de 1 dl et homogénéiser la solution.
- Rincer la cuve du photomètre avec la solution du pot de 1dl.
- Remplir la cuve du photomètre et faire la mesure.
- Noter la concentration mesurée  $C_{dil}$  ([mg/l]).

Matériel nécessaire aux essais in situ.



## Calculs

Suite à la mise en œuvre du test, les valeurs suivantes peuvent être calculées:

$$\text{Pourcentage de sables moyens et grossiers} = \%_{Sm+g} = \frac{V_{Sm+g} \times 0.6 \times (\rho_p - \rho_f)}{m_{Vf} - 12 - V_{Vf} + 5}$$

$$\text{Pourcentage de sables fins} = \%_{Sf} = \frac{(V_{Sf} - V_{Sm+g}) \times 0.6 \times (\rho_p - \rho_f)}{m_{Vf} - 12 - V_{Vf} + 5}$$

$$\text{Pourcentage de limons grossiers} = \%_{Lg} = \frac{(V_{Lg} - V_{Sf}) \times 0.6 \times (\rho_p - \rho_f)}{m_{Vf} - 12 - V_{Vf} + 5}$$

$$\text{Pourcentage de limons moyens} = \%_{Lm} = \frac{(V_{Lm} - V_{Lg}) \times 0.6 \times (\rho_p - \rho_f)}{m_{Vf} - 12 - V_{Vf} + 5}$$

$$\text{Pourcentage de limons fins et argiles} = \%_{Lf+A} = 100 - (\%_{Sm+g} + \%_{Sf} + \%_{Lg} + \%_{Lm})$$

$$\text{Valeur de bleu de méthylène} = VB = \frac{(\rho_p - \rho_f) \times 1000 \times (0,1 - (50 \times C_{dil} \times 0,003))}{(\rho_p - \rho_f) \times (m_{Bf} - 17 - (0,025 \times (v_{Bf} - 10)) + 0,01)}$$

Les formules ci-dessus ne sont applicables que si le mode opératoire a été strictement utilisé.

## Exemple de calcul Excel

m	v	m/v	vsolide	V1	V2	v3	v4	Sables moyens et grossiers	Sables fins	limons grossiers	limons moyens	limons fins et argiles	m	v	m/v	cdil	VB	IP
17.1	7.70	1.87	1.41	0	0.1	1.5	1.8	0%	4%	60%	13%	23%	19.55	11.80	1.66	0.020	24.12	28%

### Formules Excel programmées

C2=(A2-12)/(B2-5)

D2=(A2-12-B2+5)/1.67

I2=E2\*0.6/D2

J2=(F2-E2)\*0.6/D2

K2=(G2-F2)\*0.6/D2

L2=(H2-G2)\*0.6/D2

M2=1-(SOMME(I2:L2))

Q2=O2/P2

S2=1670\*(0.1-(50\*R2\*0.003))/(2.67\*(O2-17-(0.025\*(P2-10))+0.01)

T2=((0.042\*S2\*S2)+(0.16\*S2))/100