

Application de la méthode des géotypes à la cartographie des
secteurs de protection des eaux ainsi qu'aux prédispositions aux
instabilités de versants

Séverine Bilgot - severine.bilgot@epfl.ch

7 septembre 2007

Table des matières

Liste des figures	iii
Liste des tableaux	iv
Remerciements.	v
Avant-propos	vi
1 Elaboration d'une méthodologie de cartographie des secteurs de protection des eaux souterraines : application à la carte de Morges	1
1 Introduction	2
2 Règles d'attribution des secteurs et des indices de ressources	3
2.1 Secteurs	3
2.2 Indices de ressources en eau	5
2.3 Synthèse	6
3 Protocole	7
3.1 Préparation	7
3.2 Réalisation de la carte automatisée	7
3.3 Vérifications et corrections manuelles	8
4 Résultats	8
5 Conclusion et perspectives	9
2 Influence des facteurs hydrogéologiques sur la prédisposition d'un versant aux instabilités	10
1 Introduction	11
2 Influence de l'eau sur les versants	13
2.1 A l'échelle de l'échantillon : modification des propriétés intrinsèques des matériaux	14
2.1.1 Poids volumique	14
2.1.2 Cohésion	15
2.1.3 Angle de frottement interne	16
2.2 A l'échelle du versant : pression de pore et forces de percolation	17
2.2.1 Augmentation de la pression de pore	17
2.2.2 Augmentation des forces de percolation et suffosion	20
2.3 Synthèse sur l'influence de l'eau sur les instabilités de versants	21
3 Méthodes de caractérisation des paramètres prédisposant aux instabilités	24
3.1 Formations superficielles meubles	24
3.1.1 Approche de la granulométrie grossière par télédétection	24
3.1.2 Evaluation <i>in situ</i> de la granulométrie de la matrice	25
3.1.3 Détermination des unités géologiques homogènes et de leur susceptibilité aux instabilités de versants	27
3.2 Rocher	27
3.2.1 Evaluation de la perméabilité des géotypes rocheux	27
3.2.2 Détermination des unités géologiques homogènes et de leur susceptibilité aux instabilités de versants	28
3.3 Topographie	28
3.4 Hydrologie	28

4	Applications	29
4.1	Intégration à un S.I.G.	29
4.2	Tests sur le terrain	32
4.2.1	Glissement de terrain de Travers	33
4.2.2	Glissement et coulée de Villars-sur-Ollon	37
4.2.3	Glissement du Hohberg	38
4.2.4	Glissement de la Frasse	40
4.2.5	Glissement de Montagnon-Produit	41
4.2.6	Glissement-coulée de Fälli Hölli	44
4.2.7	Coulée des Clées	45
4.2.8	Ovaille de Gondo	47
4.3	Synthèse	49
5	Conclusion et perspectives	50
	Bibliographie.	53
	Annexes	54

Table des figures

1.1	Traitement des polygones de glissements de terrains	4
1.2	Traitement des polygones d'alluvions présentant des résistivités inférieures à 130 Ω .m	4
1.3	Attribution d'indices de ressources pour les polygones lacustre de delta	5
2.1	Méthodologie actuelle pour la réalisation des cartes de danger relatives aux instabilités de versants	11
2.2	Nouvelle méthodologie envisageable pour la réalisation des cartes de danger relatives aux instabilités de versants	12
2.3	Forces intervenant dans la stabilité des versants	13
2.4	Influence du pourcentage d'argiles sur la porosité (Al-Shayea, 2001)	14
2.5	Evolution du poids volumique en fonction de la saturation pour différents teneurs en argiles; la ligne en trait plein correspond aux poids calculés avec une densité spécifique de 2.7, les enveloppes englobent les valeurs obtenues avec des densités spécifiques comprises entre 2.6 et 2.8.	15
2.6	Evolution de la cohésion en fonction de la saturation pour différents teneurs en argile (Al-Shayea, 2001).	15
2.7	Evolution de l'angle de frottement interne en fonction de la saturation pour différents teneurs en argile (Al-Shayea, 2001).	16
2.8	Evolution de la pression de pore en fonction des contrastes de perméabilités.	17
2.9	Evaluation de la perméabilité d'un sol en fonction de sa granulométrie (d'après Dubé et Barabé (1991), modifié).	18
2.10	Phénomène de suffosion au sein d'un glissement de terrain	21
2.11	Aperçu quantitatif de l'influence des propriétés intrinsèques des matériaux, de la pression de pore et de la pente sur le facteur de sécurité	22
2.12	Interactions au sein des versants instables	23
2.13	Résultats des tests de validation de la méthode de granulométrie par télédétection	25
2.14	Détermination des UGHs en fonction de la granulométrie de la matrice	27
2.15	Fenêtre de saisie des données initiales, seule phase manuelle de la réalisation de la carte de prédisposition aux instabilités de versants	31
2.16	Consultation des informations relatives à un polygone de la carte de Travers	31
2.17	Localisation des glissements et coulées étudiés.	32
2.18	Carte et coupe géologiques du secteur de Travers.	33
2.19	Image LIDAR du Val de Travers (SITN ©2007, MNT LIDAR réalisé avec Scan2map-EPFL)	34
2.20	Caractérisation de la moraine latérale par l'essai au bleu de méthylène	35
2.21	Carte de prédisposition aux instabilités de versants de Travers	35
2.22	Etapes de la réalisation de la carte de prédisposition aux instabilités de Travers	36
2.23	Carte de prédisposition aux instabilités de versants de Villars-sur-Ollon	38
2.24	Carte de prédisposition aux instabilités de versants du Hohberg	40
2.25	Carte de prédisposition aux instabilités de versants de La Frasse	42
2.26	Carte de prédisposition aux instabilités de versants de Montagnon-Produit	43
2.27	Carte de prédisposition aux instabilités de versants de Fälli-Höllli	45
2.28	Carte de prédisposition aux instabilités de versants des Clées	47
2.29	Carte de prédisposition aux instabilités de versants de Gondo	48

Liste des tableaux

1.1	Règles d'attribution des codes de secteurs de protection et des indices de ressources en eau souterraine pour les géotypes meubles.	6
1.2	Règles d'attribution des codes de secteurs de protection et des indices de ressources en eau souterraine pour les géotypes rocheux.	7
2.1	Gammes de perméabilités les plus courantes pour les géotypes rocheux.	20
2.2	Evaluation de la probabilité d'occurrence de phénomènes d'instabilité pour chaque géotype (0 : très faible ; 1 : faible ; 2 : moyenne ; 3 : élevée), d'après Schneider (2001), modifié.	29
2.3	Evaluation de la perméabilité des formations meubles et rocheuses (0 : très faible ; 1 : faible ; 2 : moyenne ; 3 : élevée)	30
2.4	Evaluation de la perméabilité et de la cohésion des formations meubles et de la perméabilité des formations rocheuses rocheuses (0 : très faible ; 1 : faible ; 2 : moyenne ; 3 : élevée)	30
2.5	Evaluation de la prédisposition aux instabilités de versants en fonction des classes de pentes (de 1 : très faible prédisposition à 6 : très forte prédisposition)	30

Remerciements

Je voudrais exprimer toute ma reconnaissance envers le professeur Parriaux, tout d'abord pour les connaissances qu'il m'a patiemment transmises durant ces cinq dernières années mais également pour sa générosité, sa confiance et son enthousiasme communicatif. Ce stage, et tout particulièrement notre étroite collaboration pour la réalisation de la carte des secteurs de protections des eaux souterraines, m'a une fois de plus permis de profiter intensément et avec bonheur de sa passion, de son expérience dans les domaines de la géologie de l'ingénieur et de sa connaissance pointue du canton de Vaud.

Je voudrais également remercier chaleureusement les professeurs Al-Shayea, Vedy et Ersahin pour m'avoir fait profiter de leur science des argiles et de la dimension fractale des sols au travers de nos multiples échanges de mails, et ce malgré la barrière de la langue ou l'éloignement du monde académique pour une retraite bien méritée.

Un grand merci à Adrien Pantet pour nos longues soirées de réflexion commune sur l'épineux problème de la coulée des Clées à la cabane du Tracuit, entre deux "quatre-mille" (merci également au gardien de cette même cabane pour sa compréhension ainsi que pour les "munitions" mises à notre disposition, bien que celles-ci n'aient eu sans doute guère d'effets positifs sur nos tentatives de démarches scientifiques...).

Je tiens également à remercier tout le personnel du Geolep, du LHE et du LaSIG pour leur aide et leur gentillesse, et en particulier Dani et Boris pour avoir supporté mes accès de rage vis-à-vis d'ArcGis pendant ces six derniers mois, ainsi que Yuri pour sa sympathie et pour le "coup-de-pouce" final dans l'ultime tentative de caractérisation des matériaux de la coulée des Clées...

Enfin, un grand merci à tous ceux qui m'ont "arrachée à mes chers cailloux", pour reprendre leur expression, à savoir les participants des sorties alpinisme du "Club des Montagnards des Transports Lausannois". La confiance qu'ils m'ont accordée et leur inépuisable bonne humeur ont été de réelles bouffées d'oxygène dans la dernière ligne droite de ce travail.

Avant-propos

J'ai effectué ce stage de fin d'études au laboratoire Geolep de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, laboratoire au sein duquel je travaille régulièrement depuis juillet 2003.

Au cours des six derniers mois, j'ai pu m'investir dans différents projets :

- Participation à la rédaction d'articles scientifiques :
 - GABUS, J.-H. *et al.* Le Tassement des Monts de Bex : tassement spectaculaire actif ou stabilisé? Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles, sous presse ;
 - PANTET, A. *et al.* New method for in situ characterization of uncemented material. Engineering Geology, sous presse ;
- Encadrement de stagiaires :
 - Emma Mamifarananahary (Madagascar National Institute for Nuclear Science and Technology, stage de DEA) : modélisation du bassin versant hydrogéologique de Morondava, Madagascar, initiation au logiciel FEFLOW (février à mai 2007) ;
 - Sandra Krähenbühl (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, stage de master) : prévision de la sensibilité locale d'un versant aux mouvements de terrain par l'analyse des indices topographiques, géologiques et hydrogéologiques : exemple du glissement du Val de Travers (avril à juillet 2007) ;
 - Thomas Grandjean (Ecole Nationale du Génie de l'Eau et de l'Environnement de Strasbourg, stage de deuxième année) : pollution des eaux souterraines par les eaux de ruissellement des routes ; essai de traçage sur le site expérimental de Grandson (juin et juillet 2007) ;
- Mars 2007 à fin juin 2007 : élaboration d'un logiciel visant à automatiser la cartographie des secteurs d'alimentation des captages et basé sur la méthode des géotypes (mandataire : Etat de Vaud) ;
- Juillet-août 2007 : travail de recherche sur les facteurs hydrogéologiques et hydrologiques de susceptibilité aux instabilités de versants ;
- Activités ponctuelles diverses selon les projets en cours au Geolep : tournées piézométriques, échantillonnages, essais de traçage, campagnes de géophysique (RMT), etc.

Chapitre 1

Elaboration d'une méthodologie de cartographie des secteurs de protection des eaux souterraines : application à la carte de Morges

1 Introduction

Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un mandat confié par le Service des Eaux, des Sols et de l'Assainissement (S.E.S.A.) du canton de Vaud au laboratoire Geolep. Il consiste à proposer une méthodologie d'actualisation des secteurs de protection des eaux souterraines du canton, et ce en respectant les principes de l'OEaux (Ordonnance sur la protection des eaux, RS814.201 (1998)). Il s'agissait alors de découper le canton en trois types de secteurs :

- secteurs S protégeant les captages d'eaux souterraines ;
- secteurs A comprenant :
 - les secteurs Ao protégeant la qualité des eaux de surface ;
 - les secteurs Au protégeant les eaux souterraines exploitables ainsi que les terrains avoisinant ayant un rôle protecteur vis-à-vis de celles-ci ;
- secteurs B correspondants aux régions pauvres ou exemptes d'eaux souterraines.

Une première étape a été initiée en 2003 avec la définition du concept de secteur Ao ; malheureusement, la Confédération n'a pas encore été en mesure de valoriser les résultats obtenus ; la phase de cartographie de ces secteurs n'a donc toujours pas débuté.

La deuxième étape consiste à présent à définir les secteurs Au ; le Geolep a par ailleurs proposé au S.E.S.A. de redéfinir par la même occasion non seulement les secteurs B (faibles ressources en eaux souterraines) mais aussi les secteurs C (ressources en eaux souterraines inexistantes), abandonnés lors de la mise en place de l'OEaux mais apparaissant malgré tout sur les cartes actuellement utilisées. Enfin, il est également envisagé de profiter de cette étude pour produire une carte des indices de ressources en eau du canton, afin de pouvoir identifier les zones peu ou non productives (indice 1), moyennement productives (indice 2) et très productives (indice 3).

Pour que la méthodologie soit aussi robuste que possible, nous nous sommes fixés six objectifs principaux :

- (1) utilisation d'outils de cartographie géologique préexistants : la carte des géotypes¹ du canton de Vaud, réalisée en 2006 afin de servir de base à une nouvelle méthodologie de cartographie du risque sismique au profit de l'Etablissement Cantonal d'Assurances (E.C.A.), sera également la "clef-de voûte" de la carte des secteurs de protection des eaux souterraines ;
- (2) cartographie par S.I.G. (la plate-forme ArcInfo, disponible au Geolep ainsi qu'au S.E.S.A., a été retenue pour ce travail) ;
- (3) méthode de détermination des secteurs dictée par des critères définis au préalable et consultables directement pour chaque polygone traité ;
- (4) information relative aux caractéristiques de chaque polygone actualisable à tout moment (en particulier suite à la réalisation de sondages mécaniques) ;
- (5) phase de traitement automatisée réalisable dans un laps de temps raisonnable (inférieur à une heure) et ne nécessitant peu ou pas d'intervention humaine ;
- (6) application du principe de précaution : en cas d'incertitude, le degré de protection le plus élevé est retenu.

La réalisation et les premiers réglages du logiciel ont été effectués sur la feuille au 1: 25'000 de Morges (CN 1242), cité vaudoise située à dix kilomètres au sud-ouest de Lausanne, ce qui représente une surface de plus de 200 km².

¹Géotype : formation géologique type : outil permettant de décrire de façon homogène l'information géologique sur l'ensemble d'un territoire (de l'échelle locale jusqu'à l'échelle nationale) selon des critères génétiques pour les formations meubles (exemple : "moraine de fond") et des critères lithologiques pour les formations rocheuses (exemple : "grès") (Parriaux et Turberg, 2007).

2 Règles d'attribution des secteurs et des indices de ressources

2.1 Secteurs

La première étape de ce travail a consisté en la définition des critères d'attribution des codes des différents secteurs ; pour cela, nous nous sommes basés en premier lieu sur les géotypes. En effet, certains d'entre eux, comme le calcaire, sont *de facto* susceptibles d'abriter d'importantes ressources en eau ; ils seront donc automatiquement classés en A ; au contraire, des roches comme les argilites sont extrêmement peu perméables et n'ont donc pas besoin de mesures de protection particulières : on les traduira donc en secteurs C.

Cependant, dans la plupart des cas, ce seul critère ne s'est pas révélé suffisant ; il a donc fallu faire appel à d'autres paramètres également à notre disposition :

- résistivité électrique : la loi d'Archie permet de faire le lien entre celle-ci et la porosité et la saturation du milieu :

$$\rho_r = F \cdot \rho_w \cdot S_w^{-2} \quad (1.1)$$

avec ρ_r : résistivité électrique ($\Omega.m$) ;

F : facteur de formation (-) : il est égal à $0.62 \times \Phi^{-2.15}$ pour les formations meubles (loi de Humble) et Φ^{-2} pour les roches bien cimentées (Φ étant la porosité) ;

ρ_w : résistivité électrique de l'eau d'imbibition ($\Omega.m$) ;

S_w : saturation (-).

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi d'utiliser les classes de valeurs suivantes dans la mesure où elles sont corrélables avec celles mesurées dans des formations typiques du bassin lémanique :

- inférieure à 80 $\Omega.m$: argiles, marnes, molasses chattienne (marnes avec quelques grès) et aquitanienne (grès avec quelques marnes), moraine de fond ;
 - de 80 à 130 $\Omega.m$: sables saturés, molasse burdigalienne (grès), moraine de fond ;
 - de 130 à 200 $\Omega.m$: sables et graviers saturés, moraine de fond, frontale ou latérale ;
 - de 200 à 400 $\Omega.m$: moraine frontale ou latérale, sables et graviers imbibés ;
 - supérieure à 400 $\Omega.m$: grès, calcaires, graviers secs ;
- densité de sources :
 - périmètre très sourcier : au moins une source par hectare ;
 - périmètre moyennement sourcier : au moins une source pour dix hectares ;
 - périmètre peu ou pas sourcier : moins d'une source pour dix hectares.

D'autres géotypes ont demandé l'ajout de critères de traitement en fonction de leur voisinage ; trois cas de figures se sont alors présentés :

- glissements de terrain : bien que présentant le plus souvent de nombreuses zones sourcières, tous les glissements ne peuvent pas être considérés comme des aquifères exploitables, leurs réserves en eau pouvant être très faibles (en particulier en ce qui concerne les glissements très plastiques) ; cependant, dans les petits glissements situés en bordure de terrasses et provenant de l'érosion de celles-ci, il est possible de trouver des zones sourcières en relation avec la nappe située dans la formation adjacente (cf. figure 1.1). Il est alors nécessaire de protéger cette zone. On traduira donc en A les glissements de terrains voisins de secteurs A, les autres étant considérés comme des secteurs B.

Il est évident que cette approche conservatrice engendrera une attribution A pour des glissements situés en amont de secteurs A, et donc n'ayant pas d'influence sur la nappe abritée par le secteur aval ; cependant, la plate-forme ArcInfo ne permet pas de déterminer avec certitude si le glissement se trouve bel et bien en aval du secteur A, à moins d'employer des algorithmes particulièrement gourmands en temps de calcul (environ une heure pour un calcul de relation amont-aval sur l'ensemble des polygones concernés) ; à ce stade de l'étude,

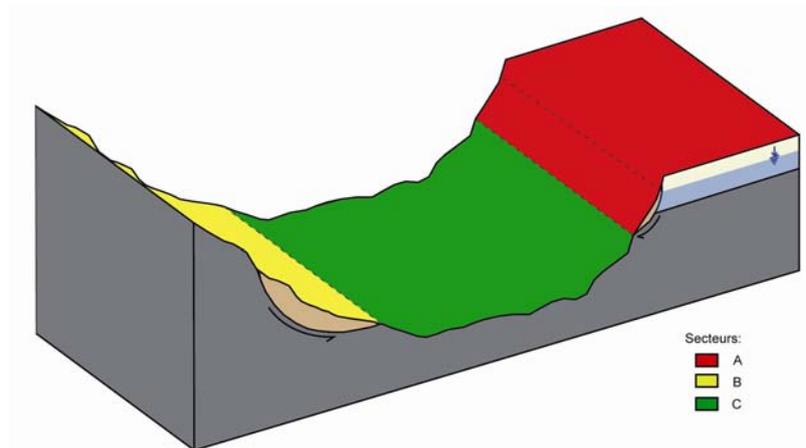


FIG. 1.1 – Traitement des polygones de glissements de terrains

alors qu'il est encore nécessaire de pouvoir réaliser rapidement de nouvelles cartes pour tester d'éventuelles variantes, il ne nous a pas semblé indispensable de procéder à ce calcul ; il sera en revanche intégré à la version finale du logiciel ;

- zones alluviales : si les polygones présentant de fortes résistivités (supérieure à $130 \Omega.m$) ont d'ores et déjà été traduits en A, des zones moins résistantes peuvent se présenter sous plusieurs configurations, nécessitant des attributions différentes (cf. figure 1.2) :
 - dépôts alluviaux peu profonds : la nappe est dans ce cas de faible épaisseur et la ressource peu importante : le secteur sera donc classé en B ;
 - frange en biseau autour d'une nappe alluviale importante (donc à forte résistivité et préalablement classée en A) : la remontée du substratum est responsable de la chute de la résistivité ; toutefois, on se trouve dans la même nappe que dans le polygone adjacent : il est donc logique de classer ce secteur également en A ;

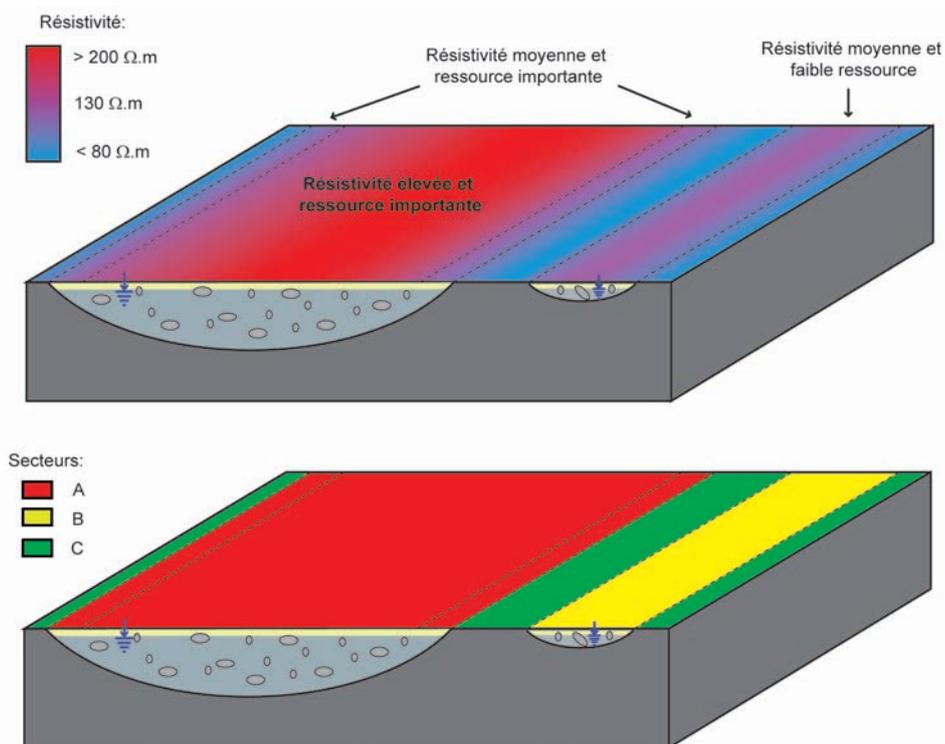


FIG. 1.2 – Traitement des polygones d'alluvions présentant des résistivités inférieures à $130 \Omega.m$

- formations peu étendues et pouvant s'avérer très perméables (remblais, éboulis, etc) : le

principe de précaution préconise d'attribuer à ces géotypes le code du secteur voisin le plus protecteur ; le même traitement sera réservé aux polygones d'une taille inférieure à cinq hectares et n'ayant pas d'attribution par ailleurs (manque de données, etc).

Enfin, un liseré de A de deux cents mètres de large à but protecteur sera imposé autour de chaque secteur S, et ce quelle que soit l'attribution originale des polygones concernés ; de la même façon, les polygones présentant la mention "présence d'aquifère sous couverture" seront également automatiquement classés en A.

Une fois ces traitements réalisés, le géologue responsable de la réalisation de la carte aura le devoir de contrôler la validité de celle-ci et, si besoin, de modifier certaines attributions lui semblant erronées en fonction des informations dont il dispose.

2.2 Indices de ressources en eau

De même que précédemment, l'attribution des indices de ressources en eau se base en premier lieu sur le géotype, puis s'appuie sur la résistivité, la densité de sources et le voisinage. Cependant, ces critères n'ont parfois pas suffi pour aboutir à des résultats satisfaisants. En particulier, les dépôts lacustres de delta se sont révélés peu adaptés à un traitement automatisé basé sur la résistivité : en effet, selon nos critères d'attribution, les polygones de ce géotype présentant des résistivités supérieures à 200 $\Omega.m$ sont considérés comme susceptibles d'être très productifs ; ils seront donc tous classés en indice 3. Or, ces sédiments au niveau desquels on a pu mesurer des valeurs de résistivité supérieures à 1000 $\Omega.m$ (typiques des graviers secs) peuvent se présenter sous deux configurations différentes (cf. figure 1.3) :

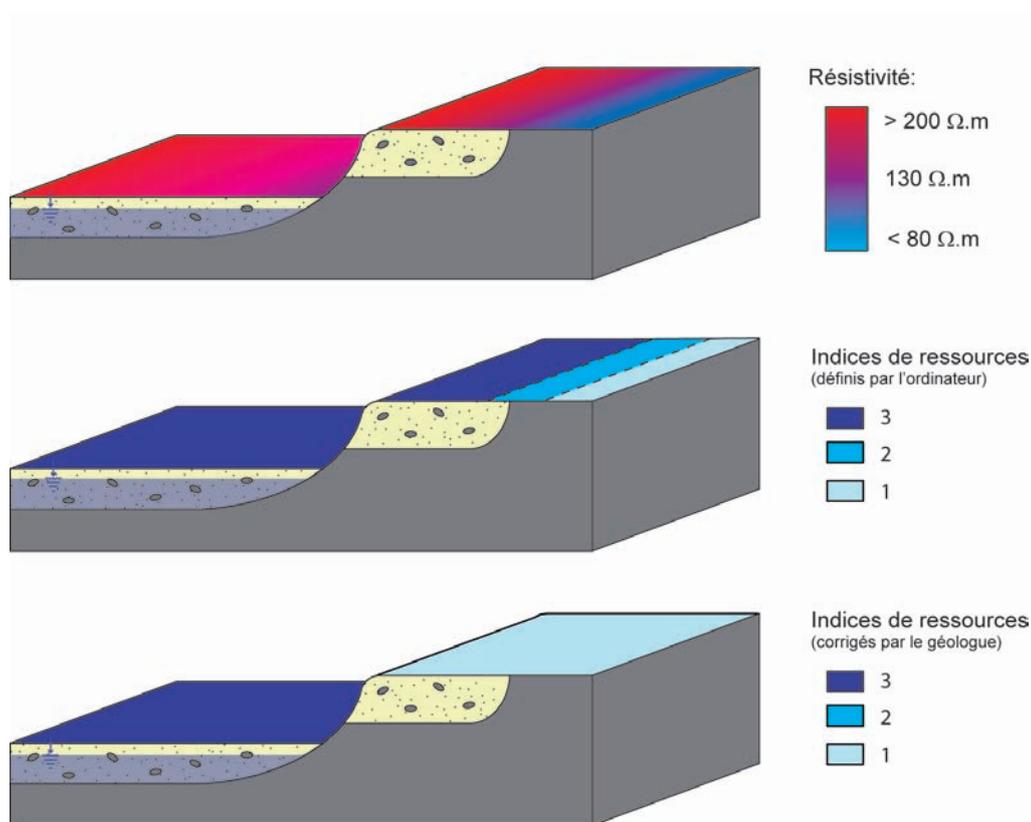


FIG. 1.3 – Attribution d'indices de ressources pour les polygones lacustres de delta

- deltas actuels pouvant abriter d'importantes ressources en eau, et donc à classer en indice 3 ;
- deltas en terrasses n'abritant au mieux que des nappes de faible épaisseur, et qui devront donc être en indice 1 ; de plus, dans la région considérée et en particulier dans les secteurs de Buchillon (situé au sud de la carte, au bord du Léman) et de Bière (bordure est de la carte), les dépôts lacustres de delta sont entourés de moraine de fond de faible résistivité, donc

également peu productives. Cependant, la méthode d'interpolation utilisée pour réaliser la carte de résistivités (méthode du minimum de courbure) a créé une tranche de résistivités moyennes entre alluvions et moraine : cet ensemble sera donc à tort classé automatiquement en indice 2 voire 3. Le géologue en charge de la réalisation de la carte devra donc se montrer particulièrement vigilant vis-à-vis des indices de ressources attribués automatiquement à ce géotype, et en particulier lorsqu'il est associé à de fortes résistivités électriques.

Cet exemple montre bien les limites de ce traitement automatisé, à savoir sa dépendance envers la géométrie des données initiales, parfois incompatibles avec la réalité, ainsi que l'importance d'une vérification humaine des incohérences en fin du processus informatisé.

2.3 Synthèse

Les règles d'attribution des codes des secteurs de protection ainsi que des indices de ressources en eau souterraine qui vont être utilisés par la suite sont exposés dans les tableaux 1.1 et 1.2.

Géotype	Résistivité (Ω.m)	Sources	Traitement selon voisinage	Traitement manuel	Secteur	IR
Remblais			secteur le plus protecteur en contact		A-B-C	1-2-3
Colluvions/Eluvions			secteur le plus protecteur en contact		A-B-C	1-2-3
Eboulis/Eboulements				nappe secondaire	A	2
				pas de nappe secondaire	B	1
Terrain glissé/affaissé			au contact d'un secteur A		A	2
			ne touchant pas de secteur A		B	1
Tuf		>1 source/ha			A	3
		<1 source/ha	secteur le plus protecteur en contact		A-B-C	1-2-3
Alluvions de plaines actuelles	>200				A	3
	130 à 200				A	2
	<130		au contact d'un secteur A alluvial		A	1
	<130		ne touchant pas de secteur A alluvial		B	1
Alluvions de plaines en terrasses			au contact d'un secteur A alluvial		A	1
			ne touchant pas de secteur A alluvial		B	1
Alluvions en cônes actuelles			au contact d'un secteur A alluvial		A	1
			ne touchant pas de secteur A alluvial		B	1
Alluvions en cônes en terrasses			au contact d'un secteur A alluvial		A	1
			ne touchant pas de secteur A alluvial		B	1
Lacustre de delta	>200				A	3
	<200		au contact d'un secteur A alluvial		A	1
	<200		ne touchant pas de secteur A alluvial		B	1
Lacustre de fond	>130				B	1
	<130				C	1
Craie lacustre				intercalations perméables	B	1
				pas d'intercalations perméables	C	1
Palustre			secteur le plus protecteur en contact		A-B-C	1
Moraine superficielle			secteur le plus protecteur en contact		A-B-C	1
Moraine frontale	>200				A	3
	<200				B	2
Moraine latérale	>200				A	3
	<200				B	2
Moraine de fond	>130	>1 source/10 ha			B	2
	>130	<1 source/10 ha			C	1
	<130				C	1
Moraine aquatique					C	1
Fluvioglacière	>200				A	3
	<200				B	2
Glaciolacustre	>130				B	1
	<130				C	1
Loess			secteur le plus protecteur en contact		A-B-C	1-2-3

TAB. 1.1 – Règles d'attribution des codes de secteurs de protection et des indices de ressources en eau souterraine pour les géotypes meubles.

Géotype	Résistivité ($\Omega.m$)	Sources	Traitement selon voisinage	Traitement manuel	Secteur	IR
Conglom.avec qq. marnes					B	1
Grès					B	2
Grès avec qq. marnes		>10 sources/10 ha			A	2
		1 à 10 sources/ 10 ha			B	1
		<1 source/10 ha			C	1
Marnes avec qq. grès		1 à 10 sources/ 10 ha			B	1
		<1 source/10 ha			C	1
Alt. grès-schistes argileux		>10 sources/10 ha			A	2
		1 à 10 sources/ 10 ha			B	1
		<1 source/10 ha			C	1
Argilite				C	1	
Marnes				B	1	
Alt. marnes-calcaires				B	2	
Calcaire				A	3	
Calcaire siliceux				A	2	
Calcaire argileux				B	1	
Calcaire dolomitique				A	2	
Dolomie				A	2	
Gypse				A	3	
Cornieule				A	3	
Anhydrite				A	1	
Roche salifère				A	1	
Quartzite				B	2	
Gneiss				B	1	
Granite				B	1	

TAB. 1.2 – Règles d’attribution des codes de secteurs de protection et des indices de ressources en eau souterraine pour les géotypes rocheux.

3 Protocole

La réalisation des cartes des secteurs de protection des eaux souterraines et des indices de ressources se déroule en trois étapes :

- (1) une phase de préparation des données ;
- (2) une phase informatique ;
- (3) une phase de vérification.

3.1 Préparation

La première étape consiste à consulter les archives du S.E.S.A. (et en particulier la base de données des forages réalisés pour l’installation de sondes géothermiques, particulièrement bien fournie en ce qui concerne le canton de Vaud) afin d’apporter d’éventuelles modifications aux cartes des géotypes, des sources et des aquifères sous couverture (les cartes réalisées et utilisées dans le cadre de cette étude sont disponibles en annexe 2). Il serait bon également de vérifier que la carte de résistivités électriques ne présente pas d’incohérences et, si nécessaire et dans la mesure du possible, de corriger celles-ci.

Enfin, le géologue chargé de la réalisation de la carte devrait dès ce stade affecter à quelques polygones des codes de secteur de protection impératifs qui devront obligatoirement être respectés dans la carte finale.

3.2 Réalisation de la carte automatisée

L’algorithme d’attribution des codes de secteurs de protection et des indices de ressources ce présente sous la forme d’une ArcToolbox transposable d’un ordinateur à l’autre par simple copier-coller. Il comprend cent-quatre étapes, réparties en trois phases successives :

- (1) une phase de traitement en fonction des caractéristiques hydrogéologiques (géotype, densité de sources et présence ou non d’aquifère sous couverture) et géophysique (résistivité électrique) des polygones ;
- (2) une phase de traitement en fonction du voisinage des polygones aboutissant à la carte automatisée des secteurs de protection ;

(3) une phase d'attribution de l'indice de ressources.

Toutes ces étapes s'enchaînent sans intervention humaine en environ vingt minutes (au lieu de deux à trois heures pour une même suite d'opérations réalisées par un opérateur qualifié).

La plupart des commandes utilisées étaient déjà incluses dans la plate-forme ArcInfo et ont juste nécessité d'être "appelées" dans la routine. A celles-ci ont été associées des requêtes SQL pour la sélection des données à traiter, des scripts de calculs d'aires (Visual Basic) pour la détermination de la densité de sources ou encore l'identification des polygones de taille inférieure à cinq hectares ainsi que des scripts de calculs conditionnels (JavaScript) pour l'attribution des codes de secteur et les indices de ressources.

Les cartes des secteurs de protection ainsi que des indices de ressources sont stockées dans un dossier "fichiers finaux", les autres fichiers produits au cours de l'exécution de la routine mais non valorisables étant enregistrés dans un dossier intitulé "fichiers intermédiaires", ces deux dossiers étant créés automatiquement au début du processus à un emplacement choisi au préalable par l'opérateur. Cette ségrégation contribue grandement à la facilité d'utilisation du logiciel dans la mesure où les cartes attendues sont isolées et donc rapidement accessibles ; à la fin de la routine, le dossier contenant les données non-désirées contient en effet plus de deux-cent cinquante fichiers.

3.3 Vérifications et corrections manuelles

Une fois les cartes réalisées, le géologue en charge de l'opération devra s'attacher à vérifier la cohérence de celles-ci, tout d'abord en vérifiant systématiquement les polygones des géotypes les moins enclins au traitement automatique (lacustre de delta) ainsi que les zones à fort gradient de résistivité (création de liserés de résistivités moyennes artificiels), puis en comparant les attributions automatiques des polygones auxquels il avait au préalable décerné un code de secteur de protection (cf. section 3.1)

4 Résultats

Les deux cartes obtenues (cf. annexes 3 et 4) ont été jugées très satisfaisantes par le S.E.S.A. lors de leur présentation le 29 juin 2007, et ce grâce à la robustesse des critères utilisés ainsi qu'à l'aspect général des cartes (un découpage en "manteau d'Arlequin" présentant une multitude de petits polygones aurait été particulièrement discriminant dans la mesure où celui-ci aurait rendu très difficile l'application de mesures de protection sur le terrain).

La carte des secteurs de protection proposée par le Geolep est assez proche de la carte utilisée actuellement au S.E.S.A., *a fortiori* si l'on ne tient pas compte des secteurs Ao apparaissant sur celle-ci. En effet, près de la moitié de la surface de la carte ne change pas d'attribution et 10% devront être surclassés. En ce qui concerne les 40% qui sont déclassés de A vers B ou C, près de la moitié correspondent à des secteurs Ao. Il est important de noter que, parmi ces régions sensibles (anciens et nouveaux A, donc devant se soumettre à des législations différentes), plus de 80% sont occupées par des surfaces agricoles ou forestières et moins de 3% (soit environ 150 hectares) par des zones à fortes densités d'habitation, des usines ou des terrains militaires. Cette constatation a sans doute contribué à l'accueil favorable réservé par le S.E.S.A. dans la mesure où elle prédispose à une mise en place économiquement et politiquement moins délicate des nouveaux secteurs de protection.

5 Conclusion et perspectives

Les deux cartes présentées le 29 juin 2007, bien qu'encore provisoires (des travaux sont en cours pour affiner la carte des géotypes), sont d'ores et déjà utilisées par le S.E.S.A. pour évaluer les projets de forages (communication orale de Mme Anne Pichon, adjointe de l'hydrogéologue cantonal, S.E.S.A., Division "Eaux souterraines", faisant suite à la réunion du 3 août 2007). Le traitement d'une deuxième feuille (Yverdon les Bains, CN 1203) devrait débiter prochainement.

D'ici là, quelques améliorations pourraient être apportées à cette méthodologie :

- intégration à une *Personal Geodatabase* afin que la routine informatique s'exécute plus rapidement, et ce en prévision de cartes plus complexes présentant un nombre de polygones plus important ;
- prise en compte des caractéristiques physico-chimiques des eaux, afin d'appliquer un traitement particulier aux polygones présentant par exemple des eaux séléniteuses ;
- amélioration des modes de traitement des polygones de géotypes "lacustre de delta" et "glissements de terrain", limitation du liseré de A autour des secteurs S aux polygones situés en amont des sources, la partie aval n'étant pas à protéger.

Chapitre 2

Influence des facteurs hydrogéologiques sur la prédisposition d'un versant aux instabilités

1 Introduction

La Suisse est particulièrement vulnérable aux instabilités de versants. En effet, près de 10 % de son territoire présente ou a présenté par le passé de tels phénomènes (glissements de terrains, coulées boueuses, chutes de blocs, etc). Elle cherche donc à se doter d'une méthodologie efficace de détermination des zones soumises à ce type d'aléa, permettant d'aboutir à la réalisation de cartes de dangers.

Une telle méthodologie, applicable tant aux glissements de terrains qu'aux coulées de boues, a déjà été mise en place par l'Office Fédéral de l'Environnement (O.F.E.V.) et est couramment utilisée (Lateltin, 1997); elle ne se base malheureusement que sur les phénomènes en cours ou passés (cartographie géomorphologique, consultation des archives, etc; cf. figure 2.1). Les modalités de passage de la carte des phénomènes à la carte de dangers étant assez floues, elles laissent une grande marge de manoeuvre au géologue ou au géographe en charge de sa réalisation; il n'est donc pas rare qu'un même secteur étudié par deux bureaux d'études soit considéré comme stable par l'un et instable par l'autre, et ce que les cartes aient été réalisées en toute bonne foi ou dans un contexte économique et politique particulier (comme c'est parfois le cas dans certaines stations de sports d'hiver haut de gamme où la pression foncière est considérable, avec des prix au m² de terrain nu supérieurs à trois mille francs suisses, soit deux mille euros). Il n'est alors pas rare que la contestation des cartes de dangers donne lieu à de longues et coûteuses procédures d'expertises et contre-expertises, les résultats de celles-ci pouvant être également très contestables...

Ce manque de transparence constitue donc une lacune importante pour cette méthodologie. Un autre problème vient du fait qu'une instabilité peut apparaître dans une zone jusque là vierge de tout phénomène de ce type. Les récents événements climatiques extrêmes en ont souvent été les initiateurs, et il faut donc s'attendre à de nouvelles coulées ou de nouveaux glissements dans des secteurs jusqu'ici considérés comme stables.

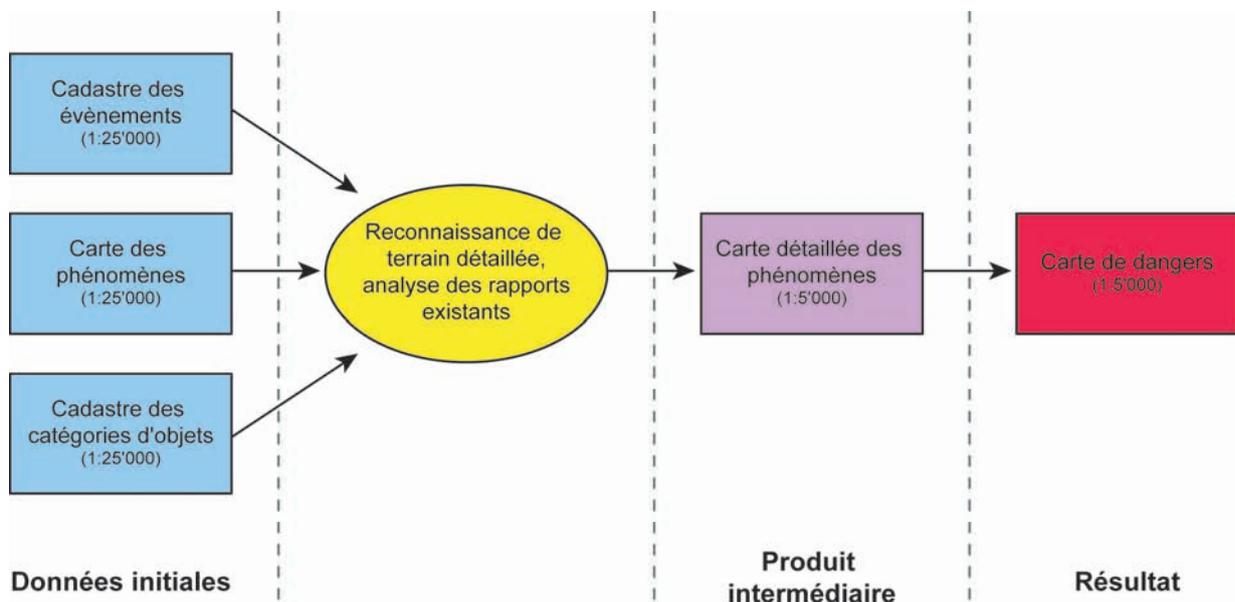


FIG. 2.1 – Méthodologie actuelle pour la réalisation des cartes de danger relatives aux instabilités de versants

Ces constats ont poussé le Geolep à orienter l'un de ses axes de recherche vers la mise en place d'une nouvelle méthodologie pour la cartographie des instabilités de versants, les objectifs étant sensiblement les mêmes que dans le chapitre précédent, à savoir disposer de critères définis au préalable pour l'attribution de degrés de susceptibilité aux instabilités puis intégrer ceux-ci à un S.I.G. afin d'aboutir à des cartes de prédispositions ainsi que des cartes de dangers aussi objectives et transparentes que possibles. Il est également impératif que cette méthodologie soit applicable avec des moyens financiers comparables à ceux investis lors de la réalisation des cartes actuelles, ce qui exclut tout recours aux méthodes de prospection "lourdes" (forages, campagnes de géophysique...)

ainsi qu'aux modélisations hydrogéologiques et hydromécaniques numériques.

Il est tout d'abord nécessaire de déterminer quels sont ces critères qui peuvent prédisposer un secteur aux instabilités. Plusieurs études menées au Geolep ont montré l'importance des facteurs lithologiques, et en particulier le géotype (Schneider, 2001; Vieira De Mello, 2002) et l'indice de plasticité (Pantet, 2005; Bilgot, 2006). Il est donc d'ores et déjà possible de réaliser des cartes faisant intervenir ces deux facteurs et d'utiliser celles-ci lors de la réalisation des cartes de danger (cf. figure 2.2).

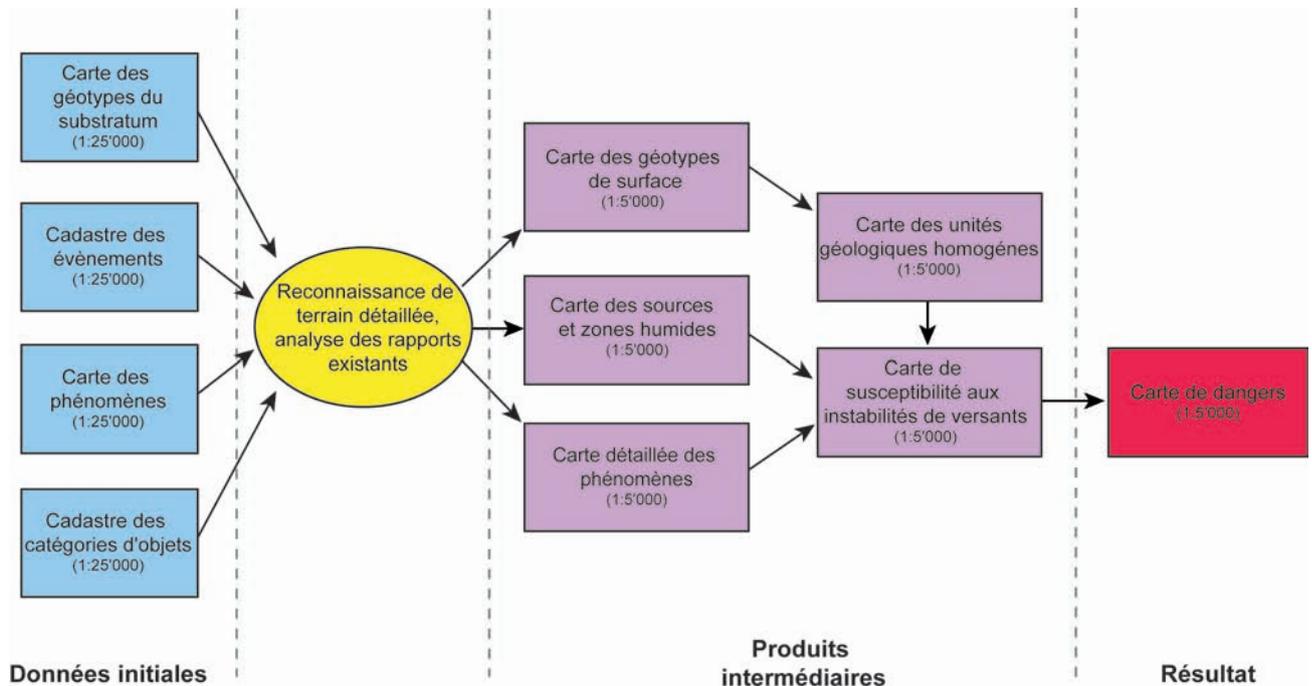


FIG. 2.2 – Nouvelle méthodologie envisageable pour la réalisation des cartes de danger relatives aux instabilités de versants

De nombreux auteurs ont également montré que l'eau revêt une importance majeure dans la prédisposition d'un terrain aux instabilités (Desvarreux, 1988; Lacube et Durville, 1989; Gervreau et Durville, 1993; Bader et Kunz, 1998; Tullen, 2002), mais ces études ne sont pour la plupart que statistiques et ne permettent malheureusement pas de déterminer le rôle de l'eau dans les glissements de terrains et coulées de boue.

L'objectif de cette étude va donc être de montrer en quoi les facteurs hydrogéologiques peuvent aggraver la susceptibilité d'un versant vis-à-vis des glissements et coulées, et en second lieu de poser les bases d'une nouvelle méthodologie permettant de prendre ceux-ci en compte lors de la réalisation des cartes de dangers.

2 Influence de l'eau sur les versants

La première étape de cette étude consiste à identifier les phénomènes imputables à l'eau au sein des versants instables ainsi que leur effet sur la stabilité de ceux-ci. Au préalable, il est important de rappeler quelles sont les forces qui régissent la stabilité d'un terrain.

Un versant est soumis à trois types de forces (cf. figure 2.3) :

- les forces normales, perpendiculaires à la pente :

$$\sigma_n = m \cdot g \cdot \cos\alpha \quad (2.1)$$

avec σ_n : force normale (N) ;
 m : masse de l'élément (kg) ;
 g : accélération de la gravité (m.s^{-2}) ;
 α : pente ($^\circ$) ;

- les forces tangentielles ou cisailantes, parallèles à la pente :

$$\tau = m \cdot g \cdot \sin\alpha \quad (2.2)$$

avec τ : force cisailante (N) ;
 m : masse de l'élément (kg) ;
 g : accélération de la gravité (m.s^{-2}) ;
 α : pente ($^\circ$).

- les forces de frottements, parallèles à la pente :

$$F = c + (\sigma_n \cdot \tan\varphi) \quad (2.3)$$

avec F : force de frottements (N) ;
 c : cohésion (Pa) ;
 σ_n : force normale (N) ;
 φ : angle de frottement interne ($^\circ$) ;

On notera que, en présence d'eau, on ne considère que les forces de frottements effectives :

$$F_{eff} = c + [(\sigma_n - u) \cdot \tan\varphi] \quad (2.4)$$

u étant la pression de pore (Pa).

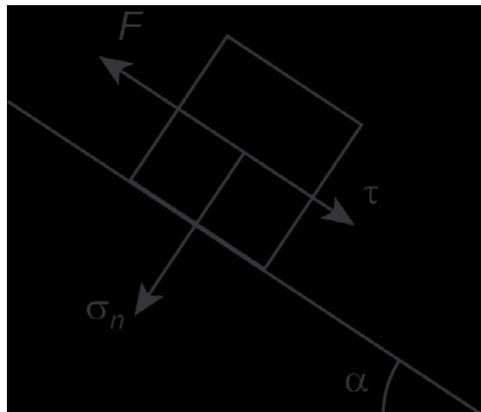


FIG. 2.3 – Forces intervenant dans la stabilité des versants

Le versant est considéré comme stable tant que les forces de frottements sont supérieures aux forces de cisaillement.

On constate donc que la stabilité d'un terrain dépend directement de la configuration du versant (pente, présence d'eau modifiant la pression de pore) ainsi que des propriétés intrinsèques des matériaux qui le composent (poids volumique, cohésion et angle de frottement interne).

2.1 A l'échelle de l'échantillon : modification des propriétés intrinsèques des matériaux

2.1.1 Poids volumique

Le poids volumique d'un terrain meuble est directement lié à son état de saturation :

$$\gamma = \gamma_w \cdot [S \cdot \Phi + G \cdot (1 - \Phi)] \quad (2.5)$$

avec γ_w : poids volumique de l'eau (N.m^{-3});

G : densité spécifique du sol (-) :

$$G = \frac{\text{poids volumique réel du sol}}{\text{poids volumique de l'eau}} \quad (2.6)$$

(le poids volumique réel du sol étant le rapport entre le poids des particules de sol sec sur le volume des particules de sol sec);

S : saturation du sol en eau (-);

Φ : porosité (-).

Si la densité spécifique des sols varie relativement peu (comprise entre 2.6 et 2.8, soit une variation relative inférieure à 7%, fonction de la nature des particules), il n'en est pas de même pour la porosité qui augmente de manière quasi-linéaire avec le pourcentage d'argiles (cf. figure 2.4 (Al-Shayea, 2001)).

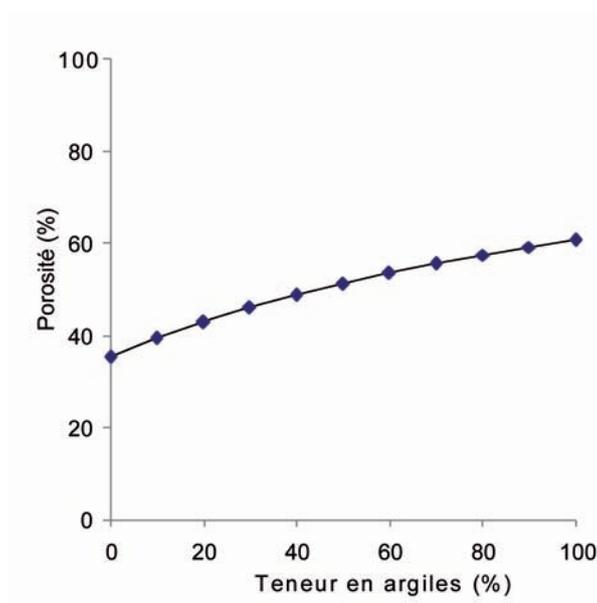


FIG. 2.4 – Influence du pourcentage d'argiles sur la porosité (Al-Shayea, 2001)

Ainsi, le poids volumique des terrains augmente également de façon linéaire avec la saturation et est plus élevé pour de faibles teneurs en argiles (cf. figure 2.5) : en effet, un sol contenant 30 % d'argiles sera en moyenne 15 % moins dense qu'un sol ne contenant que 10 % d'argiles.

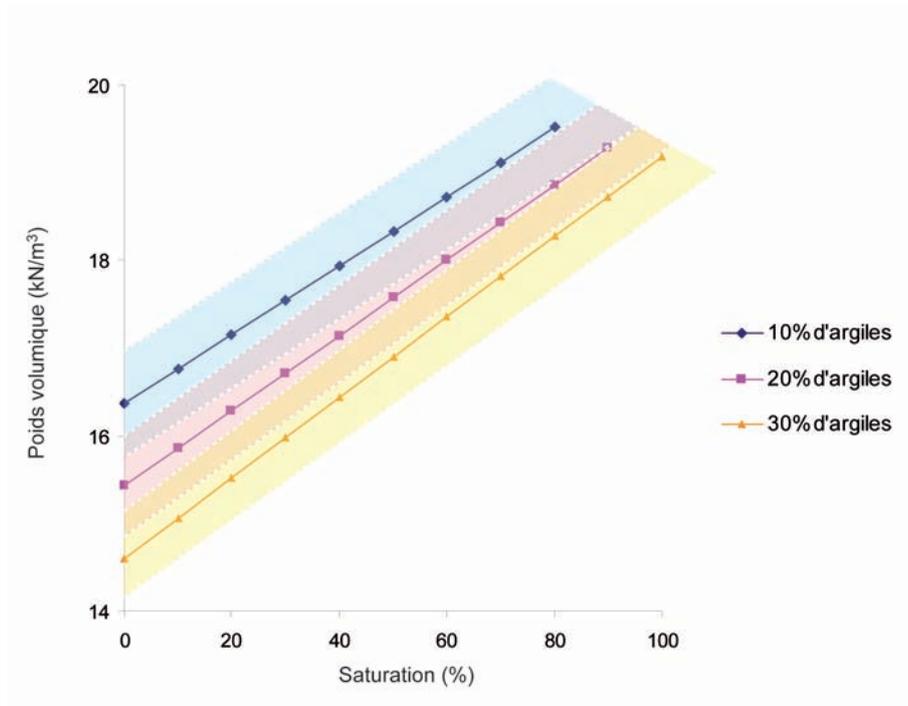


FIG. 2.5 – Evolution du poids volumique en fonction de la saturation pour différentes teneurs en argiles ; la ligne en trait plein correspond aux poids calculés avec une densité spécifique de 2.7, les enveloppes englobent les valeurs obtenues avec des densités spécifiques comprises entre 2.6 et 2.8.

2.1.2 Cohésion

La cohésion correspond à la résistance au cisaillement d'un échantillon de sol en l'absence de contrainte normale. En fonction de la nature de la formation et de son état de saturation, elle peut varier de façon considérable ; nulle pour des matériaux non-plastiques (graviers, sables ou limons purs et secs), elle atteint plusieurs centaines de kPa pour des sols argileux.

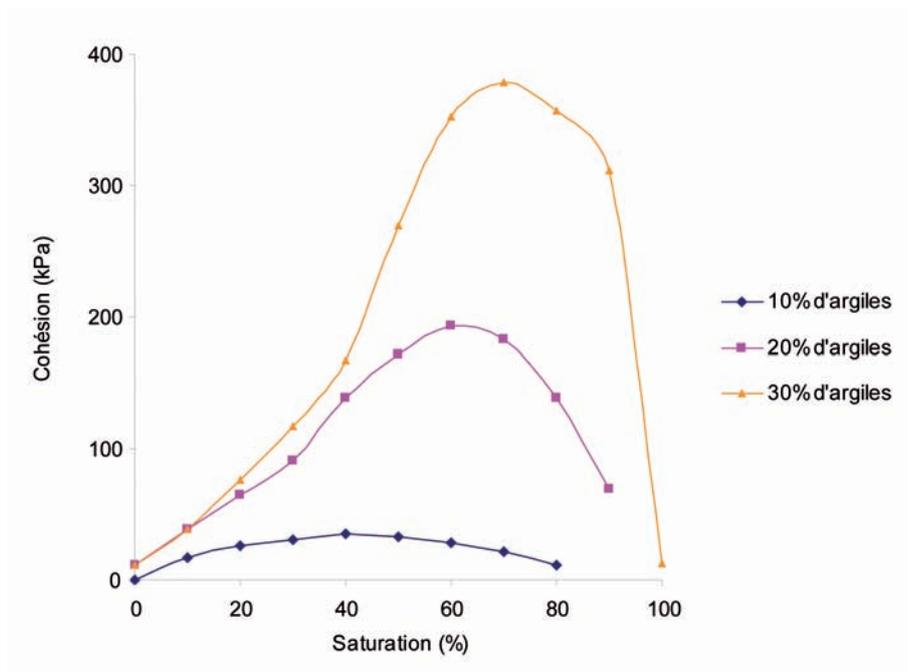


FIG. 2.6 – Evolution de la cohésion en fonction de la saturation pour différentes teneurs en argile (Al-Shayea, 2001).

Les travaux d'Al-Shayea (2001) ont montré que la cohésion augmente avec l'importance de la fraction argileuse (cf. figure 2.6). Cela s'explique par le fait que la cohésion est essentiellement due aux forces de capillarité et aux forces électrostatiques (forces de Van der Waals), ces deux facteurs étant étroitement liés à la présence d'argiles. De même, on voit que lorsque l'on dépasse un taux de saturation d'environ 60%, la cohésion chute rapidement : en augmentant la distance entre les feuillets d'argiles, les molécules d'eau tendent à annihiler les forces de Van der Waals ; de plus, à saturation, la fraction gazeuse est absente des pores : il n'y a donc plus de phénomène de capillarité (Vanapalli et Fredlund, 2000).

2.1.3 Angle de frottement interne

L'angle de frottement interne traduit les frictions entre les grains en régime cisailant. Pour les sols grenus, il dépend de la compacité, de la forme et de la rugosité des grains ainsi que de la granulométrie ; les valeurs mesurées sont alors généralement comprises entre 30 et 40 degrés.

En revanche, pour les sols fins, l'angle de frottement interne dépend du pourcentage d'argiles, de la nature de celles-ci (plus la fraction d'argiles gonflantes ou smectites est importante, plus l'angle de frottement est bas) ainsi que de leur saturation (Al-Shayea, 2001).

Globalement, on peut dire que, pour des pourcentages en argiles supérieurs ou égaux à 20 %, l'angle de frottement interne décroît lorsque la saturation augmente (cf. figure 2.7), l'eau agissant comme un lubrifiant à l'interface entre les feuillets d'argile (Horn et Deere, 1962). *A contrario*, pour des fractions argileuses plus faibles (10 %), l'angle de frottement interne décroît jusqu'à ce que le milieu soit quasi-saturé ; en-deçà, les particules d'argiles adhérant aux grains de sable sont lessivées, la lubrification est alors nettement moins importante (Tschebotarioff et Welch, 1948; Horn et Deere, 1962; Dickey, 1966; Bromwell, 1966; Procter et Barton, 1974).

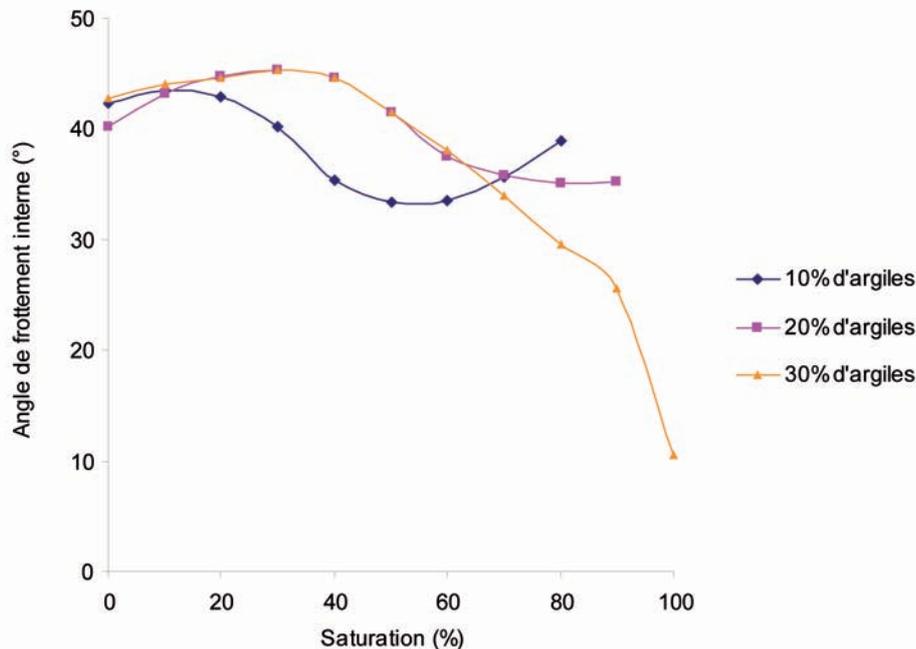


FIG. 2.7 – Evolution de l'angle de frottement interne en fonction de la saturation pour différentes teneurs en argile (Al-Shayea, 2001).

2.2 A l'échelle du versant : pression de pore et forces de percolation

A l'échelle du versant, l'eau peut avoir une influence sur la stabilité d'une pente en agissant sur deux facteurs :

- augmentation de la pression de pore ;
- augmentation des forces de percolation .

2.2.1 Augmentation de la pression de pore

La présence d'eau dans les sols et les roches peut jouer un rôle sur la stabilité d'un versant en modifiant la pression de pore au sein de celui-ci, et donc les forces de frottement effectives. S'il est possible de déterminer le champ de pression de pore pour chaque glissement en simulant les écoulements dans celui-ci, se livrer à de tels calculs serait à la fois fastidieux et onéreux, ce qui n'est pas en conformité avec les objectifs fixés ; on se contentera donc d'essayer d'isoler les paramètres pouvant avoir une influence sur la pression de pore au sein des versants. De nombreux auteurs ont souligné le rôle des contrastes de perméabilité entre substratum et formation superficielle dans l'augmentation de la pression de pore au sein du versant (Prior et Douglas, 1971; Campbell, 1975; Renwick *et al.*, 1982). En effet, un substratum moins perméable que sa couverture favorisera l'accumulation des eaux d'infiltration au niveau de la semelle du glissement ; de même, en cas de venues d'eaux profondes, des formations superficielles peu perméables joueront un rôle occlusif, ce qui provoque une augmentation de la pression (cf. figure 2.8).

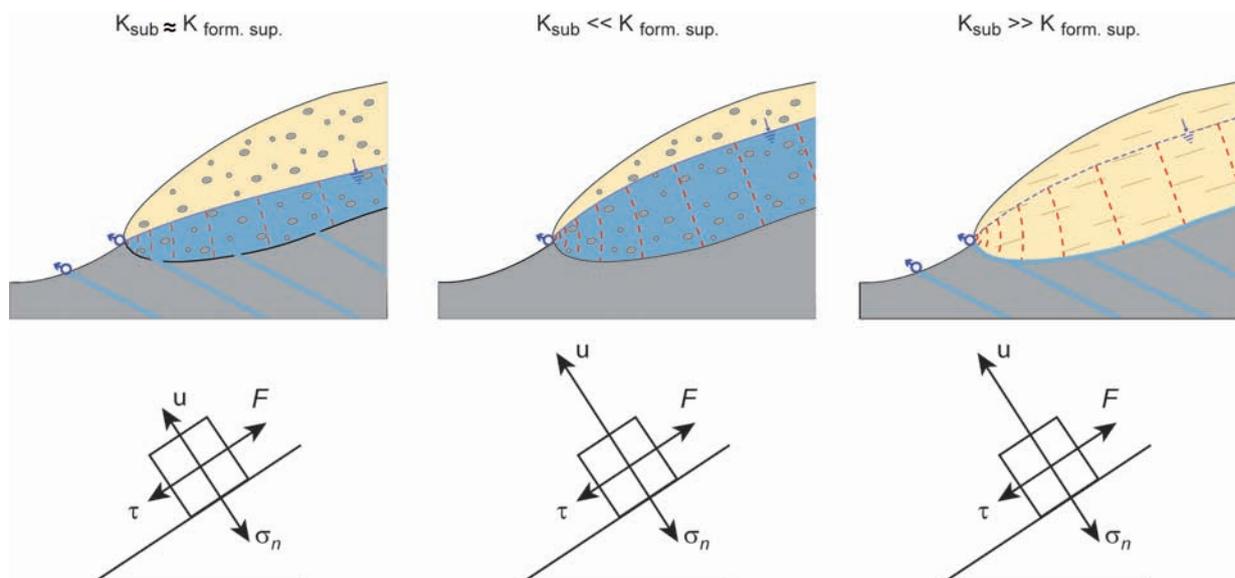


FIG. 2.8 – Evolution de la pression de pore en fonction des contrastes de perméabilités.

Si la littérature est riche de valeurs types de conductivités hydrauliques pour les grandes familles de formations, qu'elles soient meubles ou rocheuses, il est plus difficile de déterminer de manière fiable la perméabilité de celles-ci en un lieu donné, et donc avec une composition, une granulométrie et un état d'altération, de fracturation ou de karstification qui lui est propre. Il est donc nécessaire d'établir un lien entre les caractéristiques physiques et mesurables *in situ* des formations et leurs caractéristiques hydrodynamiques.

La conductivité hydraulique des formations meubles peut être approchée à l'échelle de l'échantillon par plusieurs méthodes, tant expérimentales que calculatoires :

- mesure en laboratoire de la perméabilité d'échantillons prélevés sur le terrain au moyen d'un perméamètre ; les valeurs obtenues peuvent alors être très faussées dans la mesure où les formations ont subi un fort remaniement ; de plus, cette méthode peut être très longue en

cas d'échantillons riches en argiles, donc peu perméables ;

- méthode analytique basée sur l'équation de Kozeny-Carman :

$$k = \frac{1}{k_0 \cdot S^2} \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{e^3}{1 + e} \quad (2.7)$$

avec k_0 : paramètre de Kozeny-Carman (-) ;

S : surface spécifique ($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$) ; celle-ci peut être évaluée grâce aux travaux d'Ersahin *et al.* (2006) :

$$S = 42 + (4230 \cdot F_{argiles}) + (1120 \cdot F_{limons}) - (1160 \cdot F_{sables}) \quad (2.8)$$

où $F_{argiles}$: teneur en argiles (%) ;

F_{limons} : teneur en limons (%) ;

F_{sables} : teneur en sables (%) ;

γ : poids volumique ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$) ;

μ : viscosité dynamique de l'eau ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) ;

e : indice des vides (-) :

$$e = \frac{\Phi}{1 - \Phi} \quad (2.9)$$

Φ étant la porosité du milieu (-) pouvant être estimée en fonction du pourcentage d'argiles (cf. 2.1.1) ; cependant, l'équation 2.7 étant peu fiable pour des matériaux peu perméables et la méthode d'Ersahin étant inutilisable pour des matériaux grossiers (les surfaces spécifiques calculées par cette méthode pouvant alors être négatives), la gamme de conductivités évaluables par cette méthode est très réduite ;

- utilisation d'abaques (cf. figure 2.9, Dubé et Barabé (1991)) : bien qu'apparemment plus approximative que la méthode précédente, elle s'est révélée plus fiable et permet d'évaluer les conductivités hydrauliques pour un spectre de granulométrie beaucoup plus étendu.

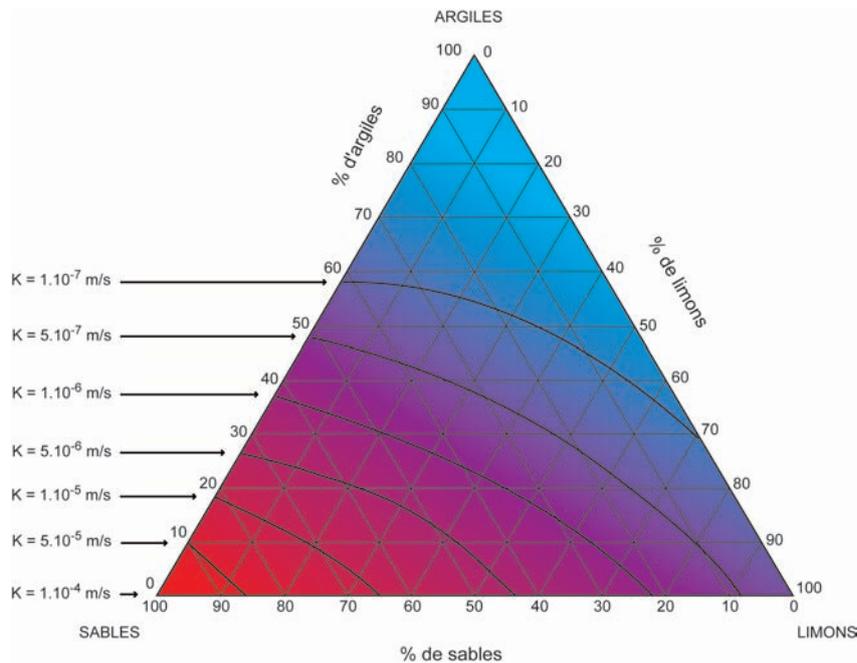


FIG. 2.9 – Evaluation de la perméabilité d'un sol en fonction de sa granulométrie (d'après Dubé et Barabé (1991), modifié).

Il est important de noter que ces valeurs de perméabilités sont valables à l'échelle de l'échantillon ; lors de l'extrapolation à l'échelle du massif, on devra donc tenir compte de la présence d'hétérogénéités dans celui-ci, particulièrement fréquentes dans les masses glissées (Matti, 2008).

La conductivité hydraulique du substratum rocheux est elle aussi importante dans la mesure où elle permet de prédire d'une part si l'eau d'infiltration va s'accumuler ou non le long de la surface de glissement, et d'autre part s'il existe des risques de venues d'eaux souterraines lors d'épisodes pluvieux (e.g. par la mise en charge de systèmes karstiques). Il est malheureusement difficile d'accéder à de telles données ; tout au plus peut-on essayer de prédire l'état d'altération, de fracturation voire de karstification de la roche à l'échelle du massif et d'y associer une fourchette de perméabilité. On pourra par exemple se baser sur les équations préconisées par Kiraly (1969), à savoir

$$k = \frac{\gamma_w}{12 \mu} \sum_{i=1}^n f_i \cdot d_i^3 (I - \vec{n}_i \otimes \vec{n}_i) \quad (2.10)$$

pour un écoulement localisé au niveau des plans des fissures et

$$k = \frac{\gamma_w \cdot \pi}{128 \mu} \sum_{i=1}^n F_i \cdot D_i^3 (I - \vec{m}_i \otimes \vec{m}_i) \quad (2.11)$$

pour un écoulement dans les chenaux et intersections de fissures,

avec γ_w : poids volumique de l'eau (N.m^{-3}) ;

μ : viscosité dynamique de l'eau ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) ;

f_i et F_i : fréquence des fissures ou des chenaux (m^{-1}) ;

d_i et D_i : ouverture des fissures ou diamètre des chenaux (m) ;

I : matrice identité ;

\vec{n}_i et \vec{m}_i : normale des fissures ou orientation des chenaux.

D'autres relations ont été proposées pour évaluer le tenseur de perméabilité d'un massif à partir de données de fracturation (Bogdanov *et al.*, 2003; Jourde *et al.*, 2007). Cependant, l'ensemble de ces méthodes restent difficilement applicables dans le cadre de cette étude dans la mesure où elles requièrent des informations peu accessibles lors de simples campagnes de cartographie, la perméabilité calculée à partir de la fracturation relevée en surface pouvant être surestimée (ouverture des fractures due à la décompression) ou sous-estimée (karstification du substratum). Ainsi, on se contentera à ce stade d'utiliser les valeurs de perméabilité déterminées lors d'études précédentes ou, le cas échéant, d'appliquer les équations 2.10 et 2.11.

Pour des roches apparaissant comme peu ou pas fissurées ou fracturées à l'affleurement et susceptibles de l'être à l'échelle de la zone considérée, les gammes de conductivités hydrauliques sont assez bien définies et peuvent être très variables selon les roches (cf. tableau 2.1).

Géotypes		Conductivité hydraulique (m.s ⁻¹)
Roches détritiques	conglomérat avec quelques marnes	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁸
	grès	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁷
	grès avec quelques marnes	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁸
	marnes avec quelques grès	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁸
	alternance grès-schistes argileux	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁸
	argilite	< 10 ⁻⁸
Séries marno-calcaires	marnes	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁸
	alternance marnes-calcaires	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁷
Roches carbonatées	calcaire	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁷
	calcaire siliceux	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁷
	calcaire argileux	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁸
	calcaire dolomitique	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁷
	dolomie	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁷
Roches évaporitiques	gypse	10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁶
	cornieule	10 ⁻⁵ à 10 ⁻⁶
	anhydrite	< 10 ⁻⁸
	roche salifère	< 10 ⁻⁸
Roches métamorphiques	quartzite	10 ⁻⁶ à 10 ⁻⁷
	gneiss	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁸
Roches magmatiques	granite	10 ⁻⁷ à 10 ⁻⁸

TAB. 2.1 – Gammes de perméabilités les plus courantes pour les géotypes rocheux.

2.2.2 Augmentation des forces de percolation et suffosion

L'eau peut également intervenir dans le cadre de forces de percolation, celles-ci étant proportionnelles au gradient de potentiel hydraulique :

$$\vec{F}_P = \vec{n} \cdot \gamma_w \cdot i \quad (2.12)$$

avec \vec{n} : vecteur unitaire orienté et dirigé selon les lignes de courant ;

γ_w : poids volumique de l'eau (N.m⁻³) ;

i : gradient de potentiel hydraulique (-).

Ces forces ont des conséquences multiples sur le versant :

- destabilisation de celui-ci lorsqu'elles sont orientées vers le haut, ce qui est le cas au front du glissement, dans la zone d'exutoire ;
- érosion souterraine (suffosion) par connexion de macro-pores pré-existants si les forces de percolation sont supérieures à la cohésion, contribuant ainsi à l'augmentation de la perméabilité des formations superficielles.

Le phénomène de suffosion peut être favorisé par plusieurs facteurs (cf. figure 2.10) :

- formations superficielles perméables et/ou peu cohésives, et ce de par leur granulométrie ou la présence de zones de faiblesse (fentes en traction, racines...) : ces milieux sont synonymes

d'une infiltration importante et rapide lors des évènements pluvieux ainsi qu'une plus forte prédisposition des particules à l'érosion ;

- substratum fracturé ou karstifié, permettant la remontée brutale d'eaux en provenance d'aquifères sous couverture ;
- forts gradients de potentiel hydraulique, tels qu'on peut les observer au front des glissements ; en effet, cette zone de terminaison présente une morphologie en biseau, ce qui implique un fort rétrécissement de la section d'écoulement (si l'on considère bien sûr qu'une nappe libre siège au bas du glissement) : le gradient de potentiel hydraulique peut donc y être très élevé (jusqu'à plusieurs dizaines de pourcents). Ces forces étant responsables de l'entraînement des particules de sol, on peut dire que plus le gradient de potentiel hydraulique est élevé, plus l'érosion sera importante.

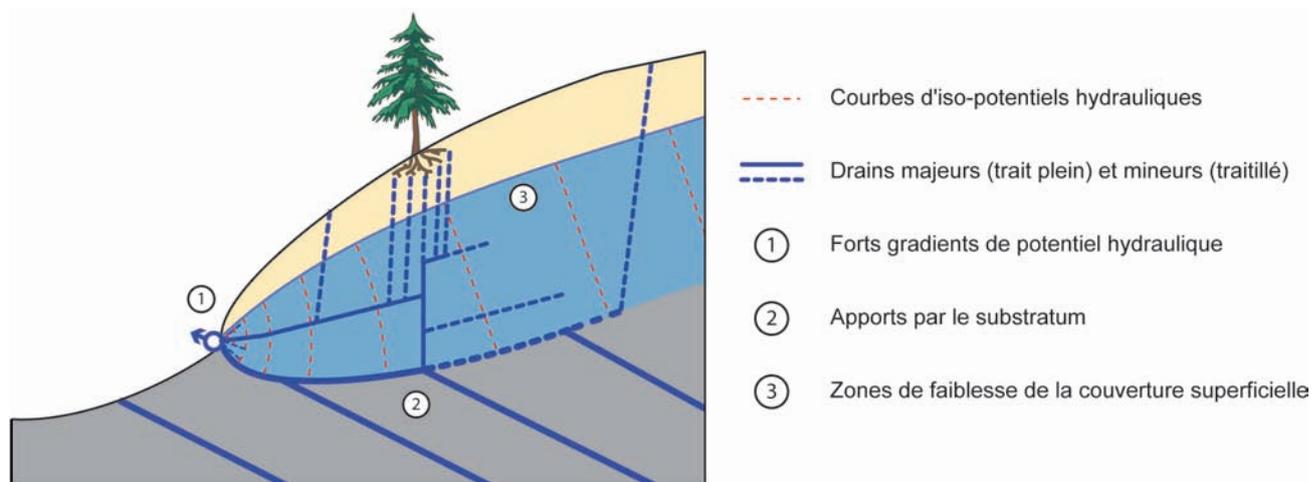


FIG. 2.10 – Phénomène de suffosion au sein d'un glissement de terrain

2.3 Synthèse sur l'influence de l'eau sur les instabilités de versants

Après avoir identifié quelques facteurs jouant visiblement un rôle dans la prédisposition aux instabilités de versants, il peut être intéressant de quantifier l'influence de ceux-ci sur le facteur de sécurité. Pour un volume unitaire de terrain, on a :

$$FS = \frac{F_{eff}}{\tau} = \frac{c + \{[(\gamma \cdot \cos\alpha) - u] \cdot \tan\varphi\}}{\gamma \cdot \sin\alpha} \quad (2.13)$$

avec F_{eff} : force de frottements effectives (N) ;

τ : forces cisailantes (N) ;

c : cohésion (Pa) ;

γ : poids volumique ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$) ;

α : pente ($^\circ$) ;

u : pression de pore (Pa) ;

φ : angle de frottement interne ($^\circ$).

Ce facteur a été calculé :

- en faisant varier les propriétés intrinsèques des matériaux : pour chaque simulation, on a utilisé un triplet {poids volumique ; cohésion ; angle de frottement interne} correspondant à un couple {teneur en argile ; saturation} donné ; dans ce cas, le calcul de FS a été réalisé avec : $\alpha = 40^\circ$, $u = 50 \text{ kPa}$;
- en faisant varier la pression de pore : nous sommes bien conscients que l'augmentation de u n'est pas un facteur prédisposant aux instabilités mais plutôt un facteur déclenchant ; cependant, comme il n'a pas encore été établi de relation numérique entre pression de pore et contrastes de perméabilité mais seulement un lien de cause à effet, on se contentera pour le moment de ne considérer que u ; les valeurs suivantes ont été utilisées pour le calcul : $c = 100 \text{ kPa}$, $\gamma = 18 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$, $\alpha = 40^\circ$, $\varphi = 40^\circ$;

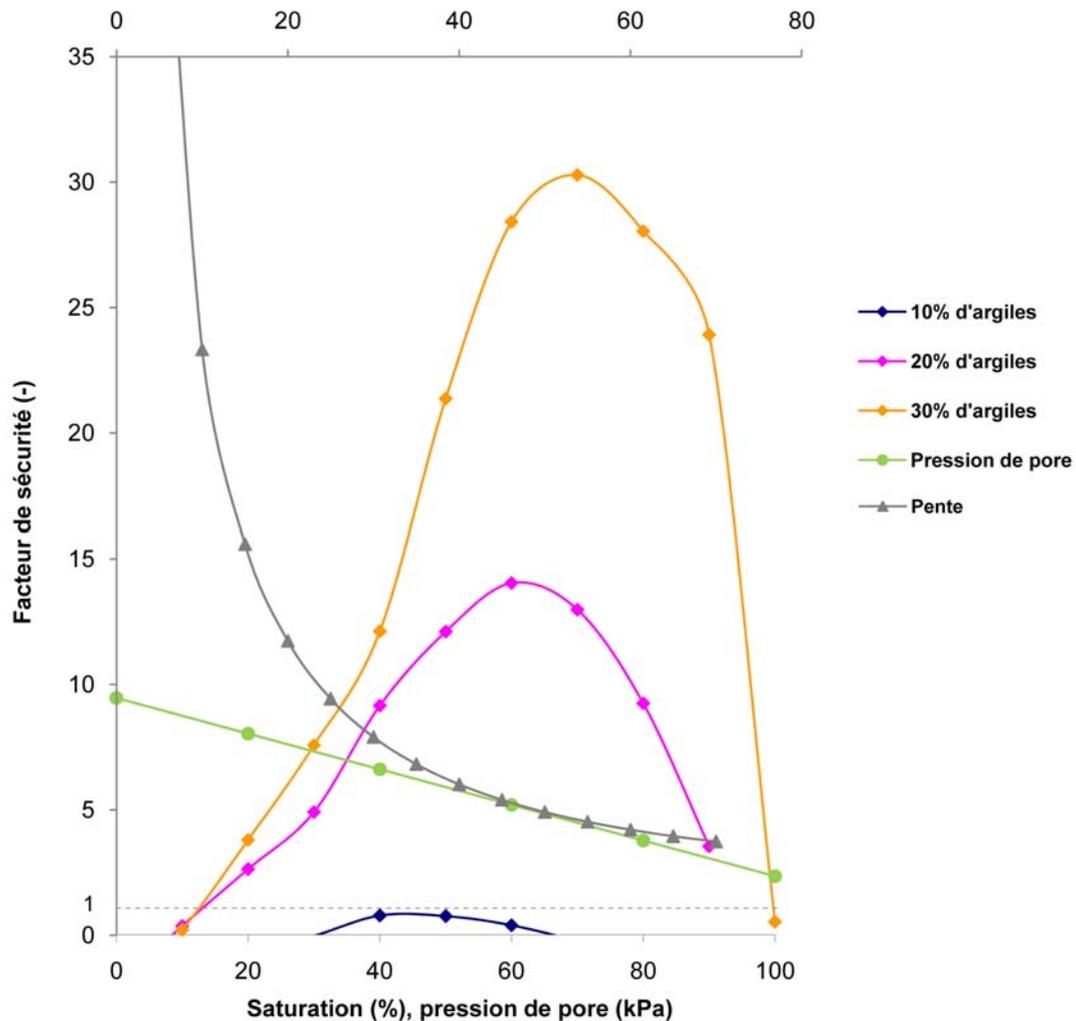


FIG. 2.11 – Aperçu quantitatif de l'influence des propriétés intrinsèques des matériaux, de la pression de pore et de la pente sur le facteur de sécurité

- en faisant varier la pente du versant ; dans ce cas, on a pris $c = 100 \text{ kPa}$, $\gamma = 18 \text{ kN.m}^{-3}$, $u = 50 \text{ kPa}$, $\varphi = 40^\circ$.

La figure 2.11 montre que la pente, le pourcentage d'argiles et la saturation (dans le cas de sols argileux) ont une influence déterminante sur le facteur de sécurité. On remarquera également qu'il existe une corrélation à plus de 85% entre les variations du facteur de sécurité en fonction de la teneur en argiles et la saturation et la cohésion en fonction de ces deux mêmes paramètres. Les variations de pression de pore interviennent également, bien que de manière moins spectaculaire. On peut donc dire que cohésion, pente et contrastes de perméabilités jouent un rôle important dans la prédisposition aux instabilités de versants.

On a pu constater également que l'eau joue un rôle complexe au sein des versants instables ; en effet, en fonction de la saturation du milieu, de sa morphologie et des caractéristiques des formations qui le compose, elle peut tout aussi bien améliorer que détériorer l'équilibre d'une masse instable (cf. figures 2.11 et 2.12).

Certains paramètres revêtent visiblement une grande importance vis-à-vis des facteurs de prédisposition aux instabilités ; il s'agit notamment :

- de la granulométrie et en particulier de la proportion de fines (cohésion et perméabilité des formations meubles) ;
- de la fracturation (perméabilité des formations rocheuses) ;
- de la saturation (cohésion, pression de pore, suffosion).

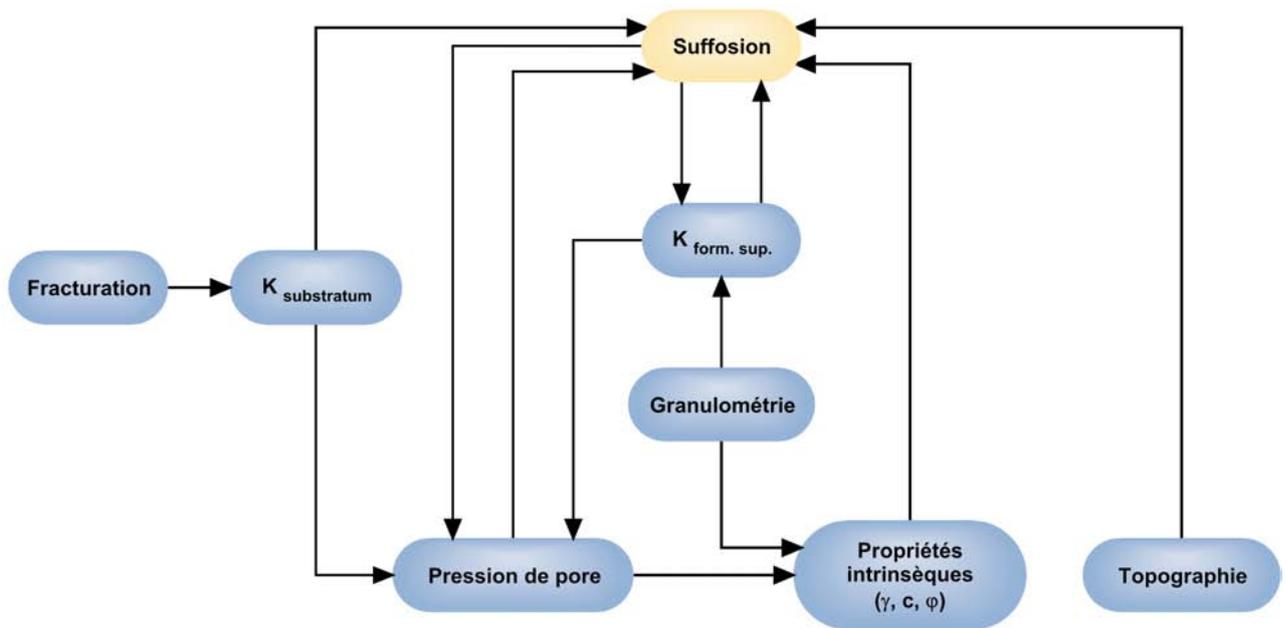


FIG. 2.12 – Interactions au sein des versants instables

Il est à noter qu'il existe de nombreuses interactions entre les phénomènes présentés ci-dessus. Aussi, lors de l'évaluation de la susceptibilité d'un secteur aux instabilités de versants, on ne pourra pas se contenter de faire intervenir les critères cités ci-dessus de manière abrupte, indépendamment les uns des autres ; il sera donc nécessaire de les regrouper en fonction du phénomène dans lequel ils interviennent. Dans le cadre de cette étude, nous envisageons de nous baser sur les associations suivantes :

- perméabilité des formations superficielles et du substratum : le contraste entre celles-ci permet d'évaluer l'augmentation potentielle de la pression de pore au niveau de la surface de glissement ; il permettra de calculer le facteur hydrodynamique I ;
- cohésion, perméabilité du substratum et présence de sources et/ou de zones humides (souvent visibles au front des glissement, elles peuvent donc indiquer que l'on se trouve à proximité de la partie terminale de celui-ci, là où les gradients de potentiel hydraulique sont les plus élevés et les forces de percolation dirigées vers le haut) : ces trois critères sont de bons indicateurs du potentiel de suffosion : ils nous permettront donc de calculer le facteur hydrodynamique II ;

A ces deux facteurs seront associés un facteur gravitaire faisant intervenir la pente ainsi qu'un dernier facteur basé sur la probabilité d'occurrence des phénomènes d'instabilité en fonction du géotype.

3 Méthodes de caractérisation des paramètres prédisposant aux instabilités

Au terme du chapitre précédent, nous avons montré que la granulométrie, la fracturation, la pente et la présence d'eau étaient des paramètres déterminants pour l'évaluation de la susceptibilité aux instabilités de versants ; il est donc maintenant nécessaire de pouvoir les qualifier voire les quantifier à partir des données à notre disposition (cartes géologiques, modèles numériques d'altitude, observations de terrain...).

3.1 Formations superficielles meubles

La granulométrie des formations meubles est traditionnellement mesurée par tamisage et sédimentométrie ; cependant, cette méthode nécessite des moyens matériels conséquents si l'on veut quantifier les fractions très grossières (blocs) ainsi qu'un temps de réalisation important pour la caractérisation de la matrice si celle-ci est très argileuse ; aussi simple et précise soit-elle, elle n'est donc pas applicable dans le cadre de cette étude. Nous avons donc choisi d'utiliser deux techniques moins conventionnelles, la première permettant de quantifier les fractions grossières (pourcentages de blocs et de graviers), la seconde amenant à une caractérisation de la matrice (pourcentage de sables, estimation de la fraction de limons et d'argiles, indice de plasticité).

3.1.1 Approche de la granulométrie grossière par télédétection

La première étape consiste à quantifier les fractions les plus grossières des formations superficielles meubles. Une méthode envisagée pour cela était d'évaluer visuellement cette fraction ; toutefois, il est apparu que les valeurs estimées pouvaient varier considérablement en fonction de l'observateur. Nous avons donc décidé de nous tourner vers les techniques de télédétection.

Le logiciel ImageJ (Burger et Burge, 2006), destiné à l'origine à des applications biomédicales, nous a semblé bien adapté à cette méthode : il s'agit en effet d'un logiciel libre, c'est-à-dire dont le code source est modifiable par l'utilisateur ; il a donc été possible d'y ajouter des composants (macros et plug-ins en langage Java) afin d'une part de détecter les fractions grossières et d'autre part de calculer leur diamètre et leur surface.

Afin de faciliter le traitement des images, nous avons réalisé quatre macros adaptées aux différents cas de figures rencontrés sur le terrain :

- matrice sombre et fraction grossière claire ;
- matrice claire et fraction grossière sombre ;
- matrice et fraction grossière peu contrastées ;
- matrice et fraction grossière bigarrées à l'échelle de la photographie.

Au sein de chacune de ces macros, le processus est globalement le même (sauf mention contraire, les fonctions utilisées étaient déjà incluses dans le logiciel) :

- importation d'une photographie de l'affleurement (résolution minimale : deux mégapixels pour une surface d'environ 1 m²) ;
- définition de l'échelle de l'image ;
- recadrage de l'image (permet d'éviter les parasites dus aux éléments extérieurs à l'affleurement observé : matériel de prospection, ciel, route...) ;
- passage d'une image 32 bit couleur à une image 8 bit ;
- accentuation des contrastes pour mettre en évidence les particules grossières par rapport à la matrice (un plug-in créé pour chaque cas cité ci-dessus) ;
- floutage de l'image ;
- segmentation (un plug-in créé pour chaque cas cité ci-dessus) et extraction des particules ;
- calcul du diamètre et de la surface des particules extraites ainsi que de la surface totale de l'image analysée ;
- exportation de ces données au format .xls ;
- calcul du pourcentage de surface occupé par les fractions de diamètre supérieur à 60 mm (blocs), compris entre 2 et 60 mm (graviers) et inférieur à 2 mm (matrice).

Afin de vérifier la validité de cette méthode, des tests ont été effectués sur seize échantillons reconstitués (mélanges blocs-graviers-sables) de granulométrie connue et représentant les quatre classes citées ci-dessus ; nous avons ainsi pu montrer que la télédétection peut être un outil particulièrement fiable pour évaluer les fractions granulométriques grossières, avec un coefficient de corrélation proche de 85% entre les valeurs calculées par le logiciel et les valeurs réelles (cf. figure 2.13). Si l'on ne tient pas compte des résultats obtenus avec les échantillons contenant une matrice et des éléments peu contrastés (coefficient de corrélation proche de 60%, donc une estimation assez médiocre de la granulométrie), on voit que l'évaluation des fractions grossières est quasi-parfaite, avec un coefficient de corrélation supérieur à 95% pour les blocs et 90% pour les graviers. Il faut cependant souligner que les matériaux utilisés pour ces tests présentaient des surfaces relativement lisses et que les conditions d'éclairage lors des prises de vue étaient optimales, ce qui est loin d'être le cas sur le terrain.

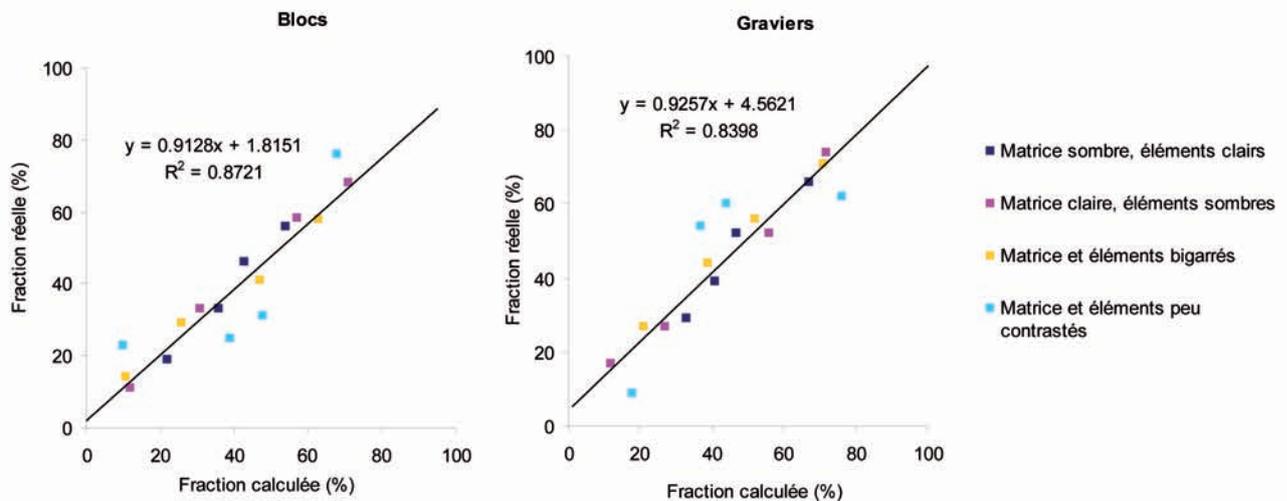


FIG. 2.13 – Résultats des tests de validation de la méthode de granulométrie par télédétection

3.1.2 Evaluation *in situ* de la granulométrie de la matrice

Afin d'évaluer la fraction matricielle des formations superficielles meubles, il est nécessaire de procéder à un second type de mesures. Les travaux de Wamytan (2003), Pouyt (2004), Pantet (2005) et Pantet *et al.* (2007) ont abouti à la mise en place d'une nouvelle méthodologie autorisant la caractérisation *in situ* des fractions fines ; elle est constituée de deux étapes :

- un essai sédimentométrique simplifié dérivant de la méthode de la pipette d'Andreasen (SN-VSS, 1972) et basé sur l'équation de Navier-Stokes :

$$v = \frac{2}{9} \times \frac{r^2 \times (\gamma_p - \gamma_w)}{\eta} \quad (2.14)$$

avec v : vitesse de décantation d'une particule sphérique (m.s^{-1}) ;

r : rayon de la particule (m) ;

γ : poids volumique de la particule (N.m^{-3}) ;

γ_w : poids volumique de l'eau (N.m^{-3}) ;

η : viscosité cinématique de l'eau à 20° C (dyne.s.cm^{-2}) ;

- un essai d'absorption du bleu de méthylène basé sur la méthode développée par le laboratoire des Ponts et Chaussées (Magnan et Youssefian, 1987; Benaben *et al.*, 1989; Tourenq et Lan, 1989), et permettant de mesurer l'indice de plasticité des argiles sans avoir recours aux limites d'Atterberg.

Le protocole utilisé dans le cadre de cette étude est le suivant :

- prélèvement à la tarière d'un échantillon de sol à une profondeur suffisante pour que celui-ci soit aussi pauvre que possible en matière organique ;
- tamisage de l'échantillon à 2 mm ;
- pesée de la fraction inférieure à 2 mm ;
- tamisage de l'échantillon à 0.5 mm ;
- pesée de la fraction inférieure à 0.5 mm ;
- introduction d'environ 15 g d'échantillon humide tamisé à 0.5 mm dans un tube à essai renfermant 40 ml de bleu de méthylène (concentration : 10 g/l) et une goutte d'antimousse silicone (permet d'éviter la formation de bulles lors de la phase d'agitation, ce qui améliore la précision de l'essai sédimentométrique) ;
- mesure de la masse et du volume de l'échantillon introduit ;
- agitation (5') ;
- mesure du volume de particules sédimentées après 5" (floculation des particules de diamètre supérieur à 0.2 mm) puis 1' (floculation des particules de diamètre supérieur à 0.06 mm) ;
- ajout de flocculant et brève agitation (environ 10") ;
- prélèvement de 50 μ l de solution au moyen d'une micropipette ;
- dilution de la solution prélevée dans 20 ml d'eau désionisée ;
- estimation de la concentration en bleu de méthylène par comparaison de la couleur de la solution avec une échelle colorimétrique pré-étalonnée.

On obtient alors :

- le pourcentage de la fraction comprise entre 0.06 et 2 mm (sables) au sein de la matrice :

$$F_{sables} = \frac{m_{>0.5mm}}{m_{<0.5mm} + m_{>0.5mm}} \left(1 - \frac{V_{1'}}{V_{introduit}} \right) + \frac{V_{1'}}{V_{introduit}} \quad (2.15)$$

avec $m_{>0.5 mm}$: masse d'échantillon refusée par le tamis à 0.5 mm (g) ;

$m_{>0.5 mm}$: masse d'échantillon après tamisage à 0.5 mm (g) ;

$V_{1'}$: volume sédimenté après une minute (ml) ;

$V_{introduit}$: volume d'échantillon introduit dans le tube (ml) ;

- le pourcentage de la fraction inférieure à 0.06 mm (limons et argiles) au sein de la matrice :

$$F_{limons+argiles} = 1 - F_{sables} \quad (2.16)$$

Il est difficile de déterminer avec précision la proportion entre fractions argileuses et limoneuses ; un essai sédimentométrique serait en effet beaucoup trop long à réaliser (il faudrait environ quinze heures pour que l'ensemble des limons sédimentent au fond du tube). On va donc essayer d'évaluer le pourcentage d'argiles en se basant sur la valeur de la concentration en bleu de méthylène.

La valeur de bleu mesurée correspond à la quantité de bleu de méthylène (en grammes) adsorbée par cent grammes de sol sec. Plus cette valeur est importante, plus la surface spécifique des particules de sol est grande. Pantet *et al.* (2007) ont défini une relation entre la valeur de bleu mesurée lors de l'essai de terrain et la surface spécifique des argiles :

$$S = 1.683 \cdot V_{B_{in situ}}^2 - 2.072 \cdot V_{B_{in situ}} + 7.805 \quad (2.17)$$

Malheureusement, il n'existe pas de relation liant de manière réellement fiable la valeur de bleu au pourcentage d'argiles, la surface spécifique de celles-ci variant en fonction de leur nature (entre 5 et 100 m^2/g pour les kaolinites et illites, de 600 à 800 pour les smectites et les montmorillonites (argiles gonflantes)). On se contentera donc à ce stade d'utiliser l'équation proposée par Ersahin *et al.* (2006), malgré les faibles coefficients de corrélation calculés lors des essais de calibration (inférieurs à 60%) :

$$F_{argiles} = \frac{S + 6.56}{396} \cdot \left(1 - \frac{m_{>0.5mm}}{m_{<0.5mm} + m_{>0.5mm}} \right) \quad (2.18)$$

avec S : surface spécifique ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$);

$m_{>0.5 \text{ mm}}$: masse d'échantillon refusée par le tamis à 0.5 mm (g);

$m_{<0.5 \text{ mm}}$: masse d'échantillon après tamisage à 0.5 mm (g).

Nous sommes bien conscients que la dernière étape de cette méthode, à savoir le passage de la valeur de bleu de méthylène au pourcentage d'argiles, est très approximatif; on ne peut donc encore parler que d'une méthode semi-quantitative voire qualitative. Il serait intéressant d'essayer de l'améliorer, par exemple en y associant une mesure de résistivité électrique au moyen d'un dispositif de type Wenner avec une distance réduite entre les électrodes.

3.1.3 Détermination des unités géologiques homogènes et de leur susceptibilité aux instabilités de versants

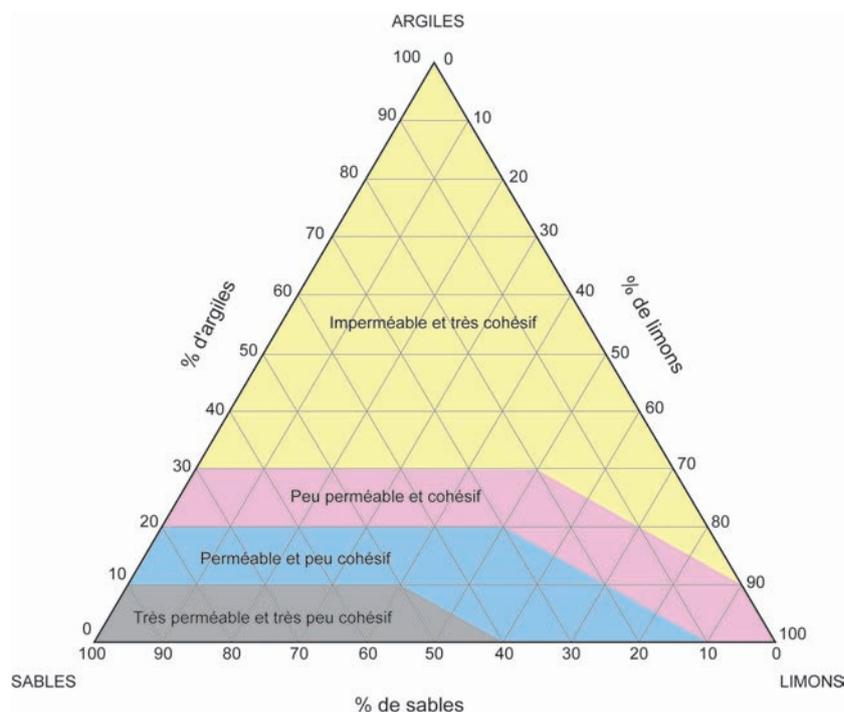


FIG. 2.14 – Détermination des UGHs en fonction de la granulométrie de la matrice

A partir des données obtenues grâce aux méthodes exposées ci-dessus, il est maintenant possible caractériser plus précisément les formations meubles observées, l'association du géotype avec les propriétés qui découlent de sa granulométrie constituant une Unité Géologique Homogène (UGH). Ainsi, les géotypes meubles pourront se présenter sous quatre formes (cf. figure 2.14) :

- très perméable (K supérieur à 10^{-5} m.s^{-1}) et très peu voire pas cohésif; cette classe comprendra entre autres les formations présentant moins de 20% de matrice;
- perméable (K compris entre 10^{-5} et 10^{-6} m.s^{-1}) et peu cohésif (c_{max} inférieur à 50 kPa);
- peu perméable (K compris entre 10^{-6} et 10^{-7} m.s^{-1}) et cohésif (c_{max} compris entre 50 et 100 kPa);
- imperméable (K inférieur à 10^{-7} m.s^{-1}) et très cohésif (c_{max} supérieur à 100 kPa).

3.2 Rocher

3.2.1 Evaluation de la perméabilité des géotypes rocheux

La perméabilité des formations rocheuses est en règle générale déterminée à l'échelle du forage à partir d'essais Lugeon (ou essais d'injection) ainsi que de pompages d'essais; les mesures réalisées sur des carottes restent assez peu fiables pour la détermination des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère dans la mesure où elles ne tiennent que peu compte de la perméabilité de fractures; les valeurs de perméabilités obtenues sont donc bien inférieures à la perméabilité à l'échelle du massif.

Dans le cadre de cette étude, de telles techniques ne sont pas envisageables étant donné que les opérations de forages qu'elles nécessitent sont à la fois longues et onéreuses. Il Aussi devra-t'on utiliser d'autres méthodes pour tenter d'évaluer ces valeurs de perméabilité.

Une première approche consiste à effectuer des relevés de fracturation en surface et d'en déduire la perméabilité du massif (cf. 2.2.1). Dans le cas où les données de fracturation ne seraient pas accessibles (couverture omniprésente) ou pour confirmer les hypothèses émises, il est également possible de se baser sur les paramètres physico-chimiques des eaux des sources souvent présentes au front du glissement ainsi que dans la niche d'arrachement. Certains paramètres sont en effet aisément quantifiables *in situ* (conductivité électrique, dureté totale, dureté calcique, sulfates, silice...) et pourraient donner des informations précieuses sur le cheminement de l'eau au sein du versant, son contact ou non avec des roches du substratum voire une évaluation grossière de son temps de séjour au sein de celui-ci.

3.2.2 Détermination des unités géologiques homogènes et de leur susceptibilité aux instabilités de versants

De même que précédemment, on va se baser sur la perméabilité des roches pour définir des UGHs associées aux géotypes rocheux :

- sain et à faible porosité cinématique (K inférieur à 10^{-7} m.s⁻¹);
- sain et à forte porosité cinématique (K compris entre 10^{-6} et 10^{-7} m.s⁻¹);
- fracturé/altéré (K compris entre 10^{-5} et 10^{-6} m.s⁻¹);
- très fracturé/karstifié (K supérieur à 10^{-5} m.s⁻¹).

3.3 Topographie

La topographie joue un rôle majeur pour l'ensemble des phénomènes gravitaires. Il est donc important de pouvoir bénéficier de données fiables et précises pour l'utiliser dans la réalisation des cartes de prédispositions aux instabilités de versants. L'office fédéral de topographie (Swisstopo) dispose de modèles numériques de terrains de résolution 25×25 mètres couvrant l'intégralité du territoire helvétique ainsi que des modèles haute résolution (maille de 0.5 mètre) pour les surfaces situées à une altitude inférieure à deux mille mètres.

Ces deux produits étant à notre disposition pour cette étude, nous avons tout d'abord réalisé grâce à la plate-forme ArcInfo des cartes de classes de pentes (moins de 5°, de 5 à 10°, de 10 à 15°, de 15 à 25°, de 25 à 40° et plus de 40°) en utilisant le MNT de maille 0.5 mètre. Cependant, il s'est avéré que les cartes obtenues présentaient une multitude de polygones de très petite taille (inférieure au m²) avec des pentes pour la plupart comprises entre 0 et 5° ou 80 et 90° (reliefs en "marches d'escalier"); ces cartes étant inutilisables, d'autres tests ont été réalisés avec des résolutions plus faibles (mailles de un à deux-cent-cinquante mètres), les meilleurs résultats ayant été obtenus avec une maille de cinquante mètres.

3.4 Hydrologie

La présence de sources et de zones humides est un paramètre important à prendre en compte dans la mesure où elle est d'une part synonyme d'une zone saturée (où les formations meubles seront donc peu cohésives) et où d'autre part elle peut être un indicateur de la zone terminale d'un glissement, ces deux paramètres étant importants dans la prédiction des risques de suffosion.

Afin de les cartographier aussi précisément exhaustivement que possible, on se basera sur le cadastre des sources que l'on complètera ou corrigera sur le terrain (cette phase de correction n'est pas négligeable dans la mesure où on a pu mettre en évidence des erreurs de géoréférencement flagrantes au niveau du cadastre des sources du canton de Vaud, avec des sources officiellement situées au milieu du lac Léman).

La seule cartographie de terrain ne semble pas non plus suffisante, la détection des sources et zones humides pouvant être altérée par des conditions climatiques défavorables, une couverture végétale très dense où encore la présence de propriétés privées.

4 Applications

Après avoir isolé quelques facteurs de prédisposition aux instabilités de versants et étant à présent capables de les qualifier voire les quantifier *in situ*, il nous a semblé essentiel de tenter de les intégrer dès à présent dans une nouvelle méthodologie de réalisation des cartes de dangers.

Pour cela, nous nous sommes imposés les mêmes contraintes que dans le chapitre 1, à savoir une méthode de cartographie par S.I.G. basée sur des critères fixés au préalable et utilisant les géotypes. Afin de ne pas risquer d'occulter les résultats obtenus en utilisant les paramètres cités précédemment, nous avons choisi de nous limiter à la réalisation de cartes de susceptibilités aux instabilités de versants, l'intervention des classes d'affectation des sols dans les cartes de dangers rendant plus difficile l'identification de l'influence des paramètres géologiques.

Une fois la routine de réalisation des cartes de susceptibilités mise en place, nous avons pu tester la viabilité de celle-ci en l'appliquant à différents glissements et coulées de boue.

4.1 Intégration à un S.I.G.

La réalisation des cartes de susceptibilités aux instabilités de versants se base sur les mêmes étapes que la méthode utilisée pour l'élaboration des cartes des secteurs de protection des eaux souterraines :

- préparation des données : carte des géotypes de surface et du substratum ainsi que des unités géologiques homogènes (caractérisation des géotypes selon des critères de granulométrie, d'altération et de fracturation), carte des sources, modèle numérique de terrain, etc ;
- traitement informatisé des données (utilisation d'une ArcToolbox) et réalisation de la carte indicative de susceptibilité aux instabilités de versants ;
- vérification et corrections manuelles, comparaison avec la carte des phénomènes.

De même que précédemment, il est nécessaire de définir au préalable les critères d'attribution des différentes classes de susceptibilité (faible, moyenne et forte). Pour cela, nous avons choisi de nous baser sur quatre facteurs :

- facteur "géotype" basé les propriétés générales des différentes formations : morphologie (terrasses), litage, sous- ou sur-consolidation, etc (cf. tableau 2.2) :

Géotypes meubles		Susceptibilité	Géotypes rocheux		Susceptibilité
Remblais artificiels		3	Roches détritiques	conglomérat avec quelques marnes	1
Colluvions/Eluvions		3		grès	1
Eboulis/Eboulements/Ecroulements		1		grès avec quelques marnes	2
Terrain glissé/affaissé		3		marne avec quelques grès	3
Tuf		0		alternance grès-schistes argileux	3
				argilite	2
Alluvions de plaines	actuelles	1	Séries marno-calcaires	marne	3
	en terrasses	2		alternance marnes-calcaires	3
Alluvions en cônes	actuelles	1	Roches carbonatées	calcaire	0
	en terrasses	2		calcaire siliceux	0
Dépôts lacustres	delta	1		calcaire argileux	2
	de fond	3		calcaire dolomitique	0
	craie lacustre	3		dolomie	0
Dépôts palustres		3	Roches évaporitiques	gypse	2
Moraines	superficielles	1		cornicule	2
	frontales	2		anhydrite	1
	latérales	2		roche salifère	2
	de fond	2		Roches métamorphiques	quartzite
	aquatiques	3	gneiss		0
Périglacière	fluvio-glaciaire	1	Roches magmatiques	granite	0
	glacio-lacustre	3			
	loess	3			

TAB. 2.2 – Evaluation de la probabilité d'occurrence de phénomènes d'instabilité pour chaque géotype (0 : très faible ; 1 : faible ; 2 : moyenne ; 3 : élevée), d'après Schneider (2001), modifié

- facteur hydrodynamique I : basé sur les contrastes de perméabilité entre substratum et couverture : pour quantifier ce facteur on utilisera les classes de perméabilité définies précédemment (cf. tableau 2.3) ; ce facteur sera égal à la valeur absolue de la différence des notes attribuées à la formation superficielle et celle du substratum, et donc compris entre 0 (faible contraste de perméabilité) et 3 (fort contraste) ;

Géotypes meubles		Géotypes rocheux	
Très perméables et très peu cohésifs	3	Sains et à faible porosité cinématique	0
Perméables et peu cohésifs	2	Sains et à forte porosité cinématique	1
Peu perméables et cohésifs	1	Fracturés/Altérés	2
Imperméables et très cohésifs	0	Très Fracturés/Karstifiés	3

TAB. 2.3 – Evaluation de la perméabilité des formations meubles et rocheuses (0 : très faible ; 1 : faible ; 2 : moyenne ; 3 : élevée)

- facteur hydrodynamique II : basé sur la cohésion des formations superficielles, la perméabilité du substratum et la présence de sources (cf. tableau 2.4) ; ce facteur sera égal à la moyenne des notes attribuées à la formation superficielle et au substratum, augmentée d'un point dans les secteurs situés à moins de cinquante mètres d'une source ou d'une zone humide ; on plafonnera la note obtenue à 3 ; pour ces deux derniers facteurs (hydrodynamiques I et II), les notes attribuées aux formations superficielles seront assignées à toute la surface du polygone de géotype auquel le point d'observation appartient ; au cas où la granulométrie de certains polygones n'auraient pas été caractérisée, on donnera à ceux-ci la note moyenne des polygones de même géotype du secteur d'étude ;

Géotypes meubles		Géotypes rocheux	
Très perméables et très peu cohésifs	3	Sains et à faible porosité cinématique	0
Perméables et peu cohésifs	2	Sains et à forte porosité cinématique	1
Peu perméables et cohésifs	1	Fracturés/Altérés	2
Imperméables et très cohésifs	0	Très Fracturés/Karstifiés	3

TAB. 2.4 – Evaluation de la perméabilité et de la cohésion des formations meubles et de la perméabilité des formations rocheuses (0 : très faible ; 1 : faible ; 2 : moyenne ; 3 : élevée)

- facteur gravitaire : basé sur les classes de pentes (cf. tableau 2.5), noté sur 6.

Pente	Note
< 5°	1
de 5 à 10°	2
de 10 à 15°	3
de 15 à 25°	4
de 25 à 40°	5
> 40°	6

TAB. 2.5 – Evaluation de la prédisposition aux instabilités de versants en fonction des classes de pentes (de 1 : très faible prédisposition à 6 : très forte prédisposition)

La relation empirique suivante permet alors de déterminer la susceptibilité du versant aux instabilités :

$$note_{finale} = \frac{1.5 \cdot note_{géotype} + 2 \cdot note_{pente} + note_{hydrodynamique\ I} + note_{hydrodynamique\ II}}{6.5} \quad (2.19)$$

De même que dans le chapitre précédent, l'attribution de ces notes ainsi que la carte de prédisposition aux instabilités de versants sera réalisée automatiquement moyennant l'utilisation d'une ArcToolbox (cf. figure 2.15).

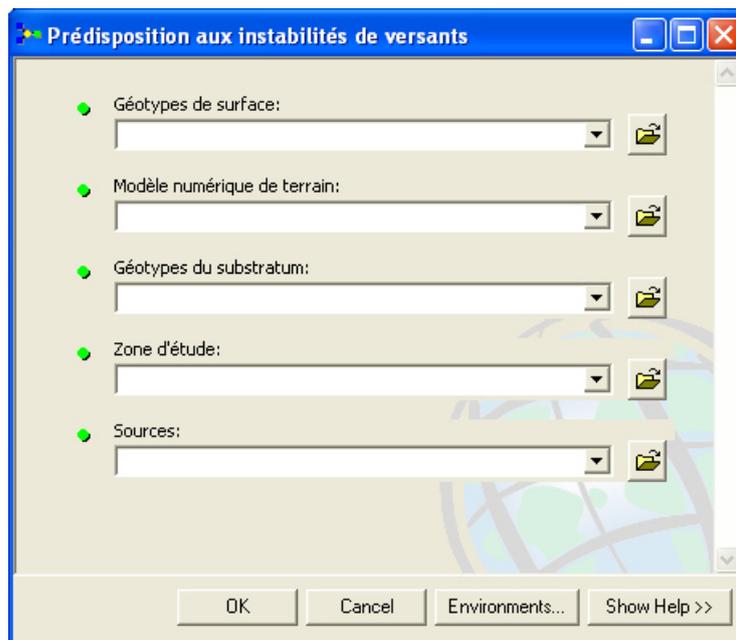


FIG. 2.15 – Fenêtre de saisie des données initiales, seule phase manuelle de la réalisation de la carte de prédisposition aux instabilités de versants

Une fois la carte réalisée (après une à trois minutes, selon la complexité de celle-ci), il est alors possible de consulter l'intégralité des informations relatives à chaque polygone (cf. figure 2.16). De même que dans le chapitre 1, il incombera alors à l'opérateur de vérifier la validité de cette carte et, si besoin, de la modifier.

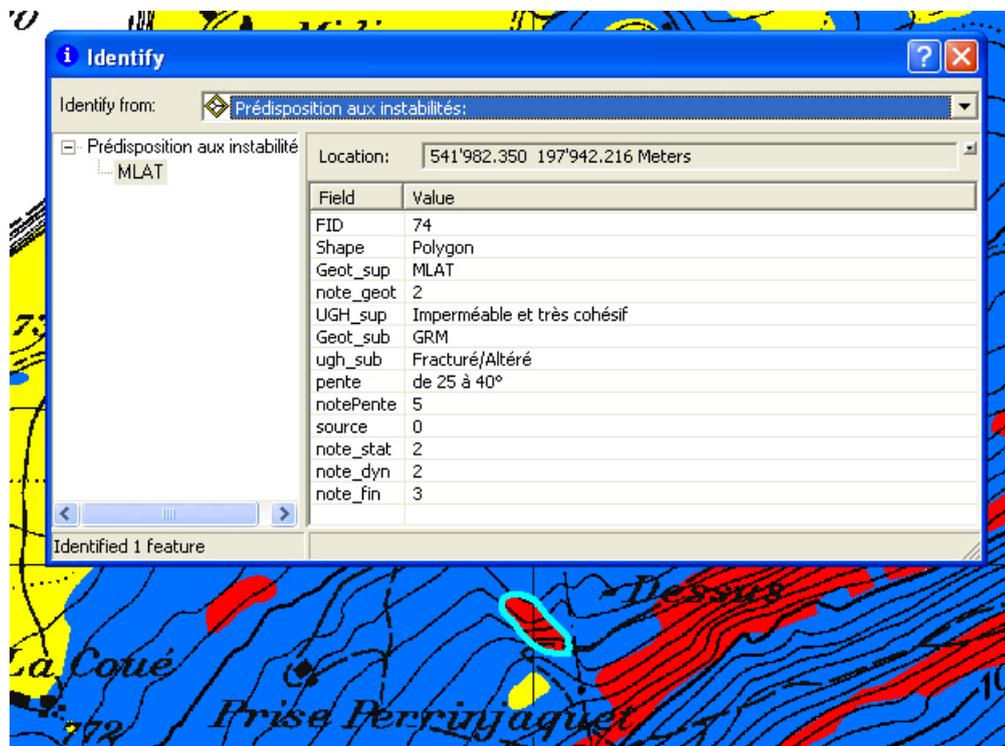


FIG. 2.16 – Consultation des informations relatives à un polygone de la carte de Travers

4.2 Tests sur le terrain

Afin de vérifier la validité de cette méthode sur le terrain, huit sites présentant des instabilités de versants ont été sélectionnés ; pour des raisons de logistique et de temps, notre choix s'est porté préférentiellement sur des glissements de terrain et des coulées de boue localisés en Suisse romande (cf. figure 2.17) et sur lesquels des études avaient déjà été effectuées (stages, thèses, réalisation de cartes de dangers, étude de faisabilité pour des mesures d'assainissement...).

Plusieurs types de phénomènes sont représentés :

- glissements de terrain (Montagnon, La Frasse, Hohberg, Villars-sur-Ollon) ;
- glissements-coulées (Travers, Fälli-Höllli) ;
- coulées de boue (Les Clées, Villars-sur-Ollon, Gondo).

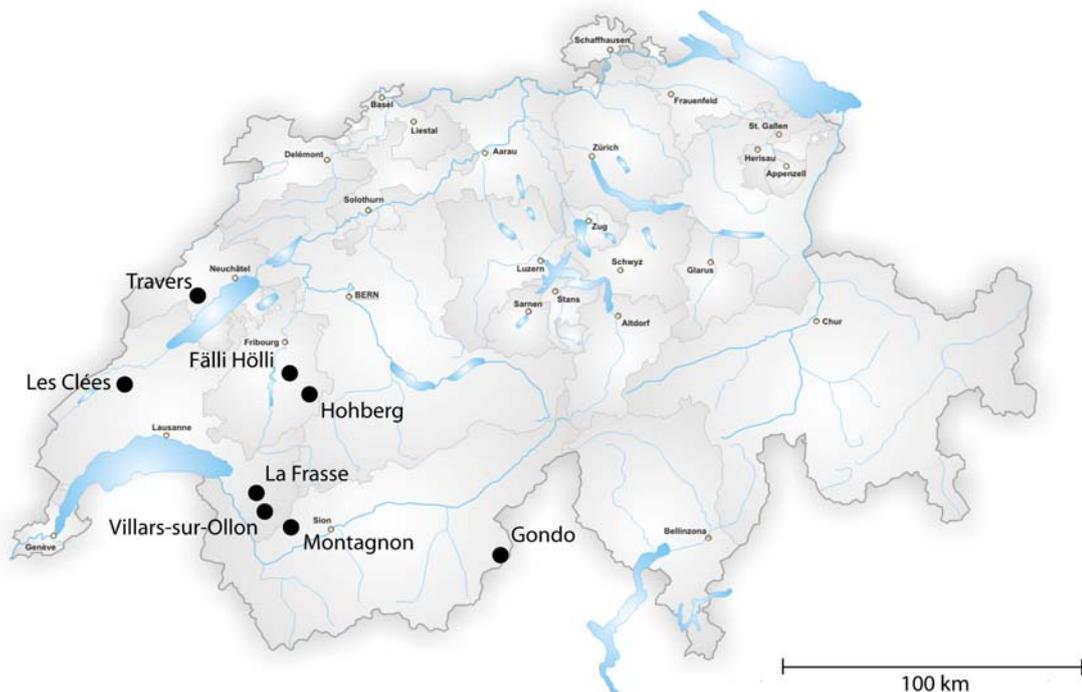


FIG. 2.17 – Localisation des glissements et coulées étudiés.

Le même protocole a été appliqué pour chaque site :

- réalisation au préalable des cartes des géotypes du substratum, des classes de pente et du réseau hydrographique en fonction des données à disposition (cartes géologiques et hydrogéologiques, modèle numérique de terrain, image LIDAR, données des guichets cartographiques cantonaux, anciennes études...);
- campagne de terrain permettant de réaliser la carte à l'échelle 1 :5'000 des géotypes de surface, d'affiner la carte du réseau hydrographique et d'évaluer la granulométrie, l'indice de plasticité et la fracturation des formations observables ; ces informations géoréférencées seront par ailleurs intégrées à une base de données ;
- importation des données dans le S.I.G. ;
- réalisation de la carte de susceptibilité aux instabilités de versants ;
- vérifications et corrections manuelles.

4.2.1 Glissement de terrain de Travers

Contextes géographique et géologique

Ce glissement-coulée est situé dans le Val de Travers, à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de Neuchâtel. Cette région est à la croisée des domaines du Jura Plissé et du Bassin Molassique suisse.

La zone d'étude est bordée au sud-est par un chevauchement mettant en contact des terrains d'âge jurassique avec la molasse aquitanaïenne à burdigalienne et au nord-ouest par le cours de l'Areuse.

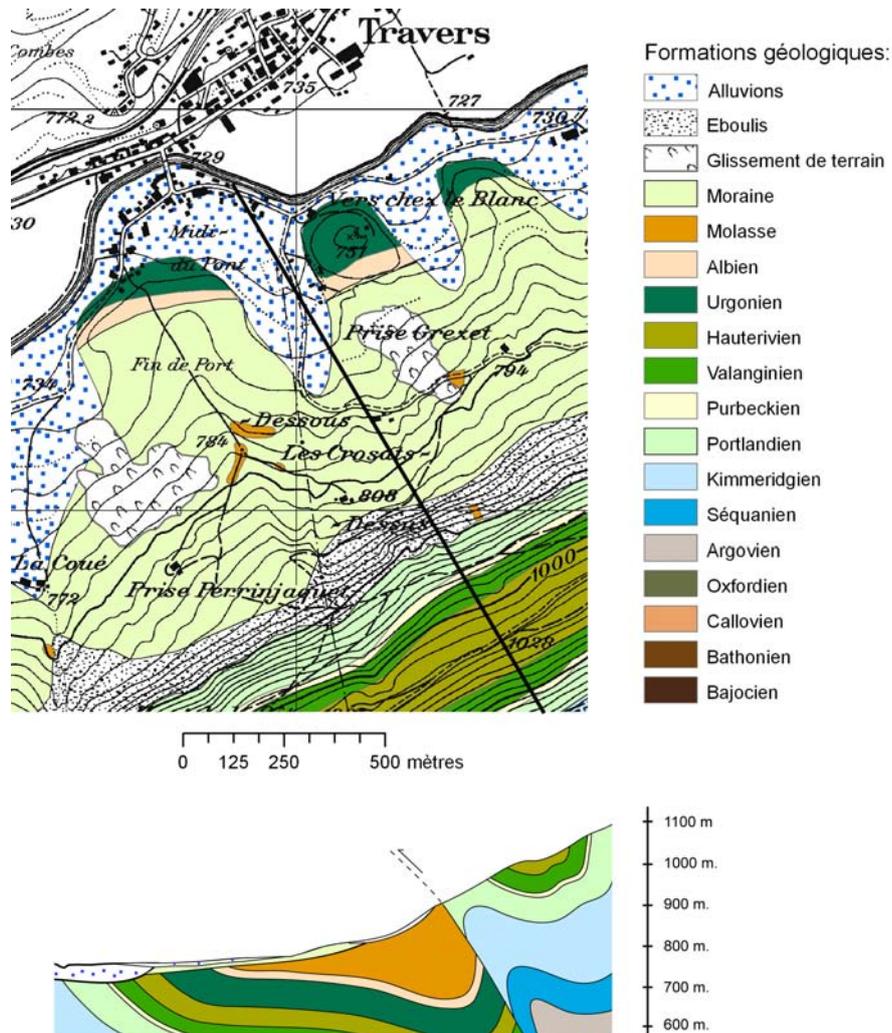


FIG. 2.18 – Carte et coupe géologiques du secteur de Travers.

Au niveau hydrogéologique, la région du Val de Travers est caractérisée par trois grands aquifères (Király, 1973) :

- aquifère du Malm, comprenant les calcaires du Séquanien, du Kimméridgien et du Portlandien ;
- calcaires du Valanginien ;
- calcaires de l'Hauterivien supérieur et de l'Urgonien.

Ces calcaires fortement karstifiés présentent à l'échelle régionale des perméabilités comprises entre 10^{-3} et 10^{-4} m.s^{-1} (Tripet, 1971). La molasse est quant à elle considérée comme peu perméable dans la vallée de l'Areuse (K compris entre 10^{-7} et 10^{-8} m.s^{-1} (Király, 1973)) ; cependant, il ne faut pas négliger les effets de l'altération sur celle-ci, la décalcification engendrant alors une hausse importante de la perméabilité (de deux à trois ordres de magnitude).

Description des phénomènes

Comme le montrent les images LIDAR (cf figure 2.19) , le Val de Travers est particulièrement vulnérable aux phénomènes d'instabilités de versants et en notamment aux coulées de boue.

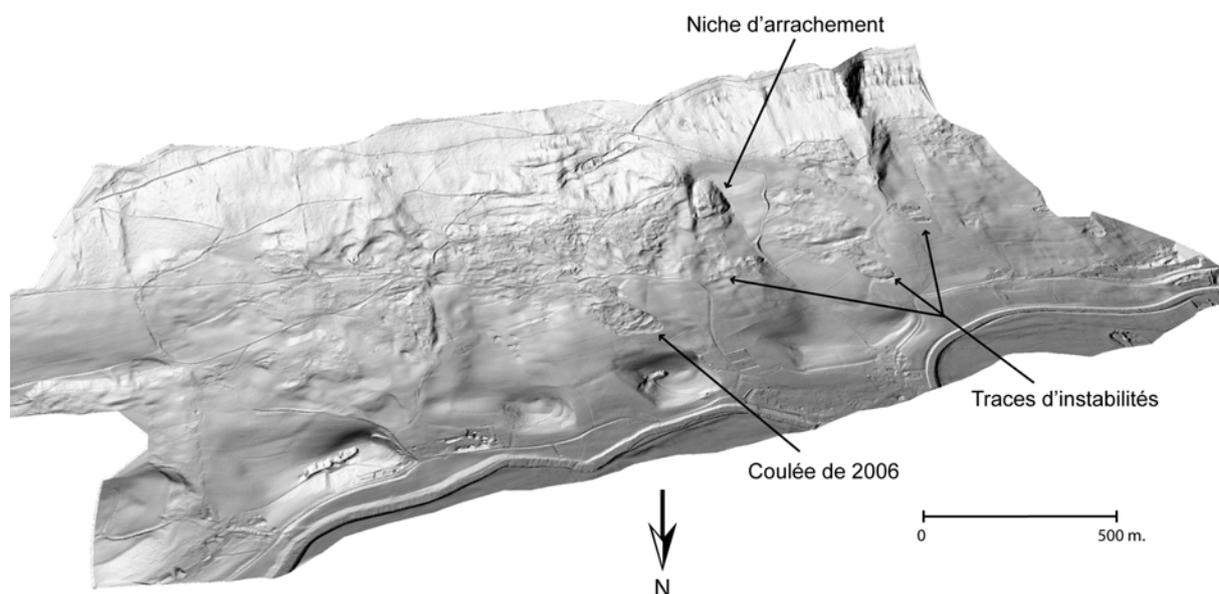


FIG. 2.19 – Image LIDAR du Val de Travers (SITN ©2007, MNT LIDAR réalisé avec Scan2map-EPFL)

Le 5 avril 2006, suite à de fortes pluies, une coulée d'environ 150'000 m³ s'est initiée au lieu-dit "Les Crosats-Dessous", emportant une route sur plusieurs dizaines de mètres en quelques jours et menaçant un pylone de l'une des plus importantes lignes électriques du canton de Neuchâtel. Plusieurs sources pérennes sont également apparues à la base de la niche d'arrachement, leurs débits ayant été estimés à environ dix litres par minute en avril 2006 (au plus fort de l'activité du glissement et après une longue période pluvieuse).

Depuis, ce glissement a montré une importante activité (mouvements de plusieurs centimètres par mois, affaissement de la nouvelle route construite en amont...) et ce malgré les travaux de drainage superficiel menés par la commune.

Campagne de terrain

La campagne de terrain a permis de mettre en évidence que la coulée de 2006 a mobilisé pour l'essentiel des matériaux morainiques grossiers à matrice très argileuse (cf. annexe 5). Les valeurs de bleu mesurées y sont en effet supérieures à 4.5 (cf. figure 2.20). Des dépôts similaires (moraine latérale *a priori* rhodanienne comme l'indiquent les blocs erratiques de granite du Mont-Blanc observés en aval de Travers) ont pu être observés sur la majeure partie du secteur d'étude. Nous avons également pu mettre en évidence de rares affleurements de molasse altérée, présentant des indices de plasticité inférieurs à 5%, soit des matériaux extrêmement peu cohésifs. Il est intéressant de remarquer que l'on trouve ce type de formation au niveau de la niche d'arrachement de la coulée de 2006. En effet, ces matériaux peu cohésifs associés à la forte pente ont sans doute constitué une zone de faiblesse dans ce versant.

De plus, on a pu constater que même après une longue période sèche (avril-mai 2007), des sources pérennes subsistaient dans la niche, présentant des débits de quatre à cinq litres par minutes. Or, ni la moraine ni la molasse ne constituent de bons aquifères ; l'eau provient donc vraisemblablement des calcaires kimméridgiens et portlandiens que l'on peut observer au-dessus du glissement et circule dans les premiers mètres de molasse au gré de zones plus altérées ; lors des fortes pluies du printemps 2006, la mise en charge de l'aquifère karstique qu'ils abritent aurait alors provoqué un

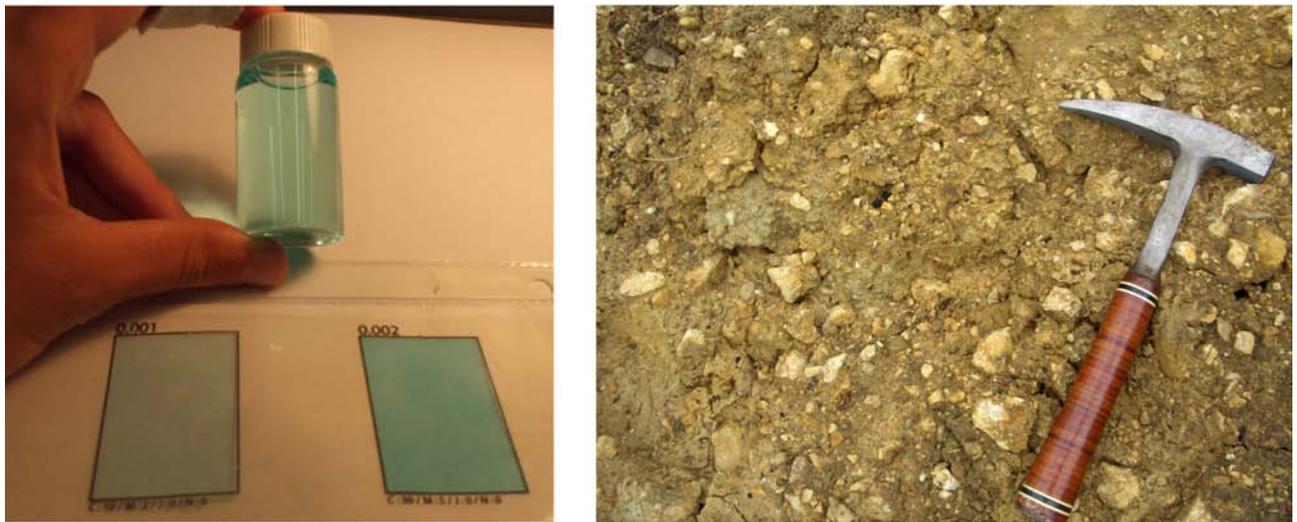


FIG. 2.20 – Caractérisation de la moraine latérale par l'essai au bleu de méthylène

soudain apport d'eau jusqu'à l'interface molasse altérée perméable/moraine peu perméable, ce qui aurait déclenché le glissement.

Carte de prédisposition aux instabilités

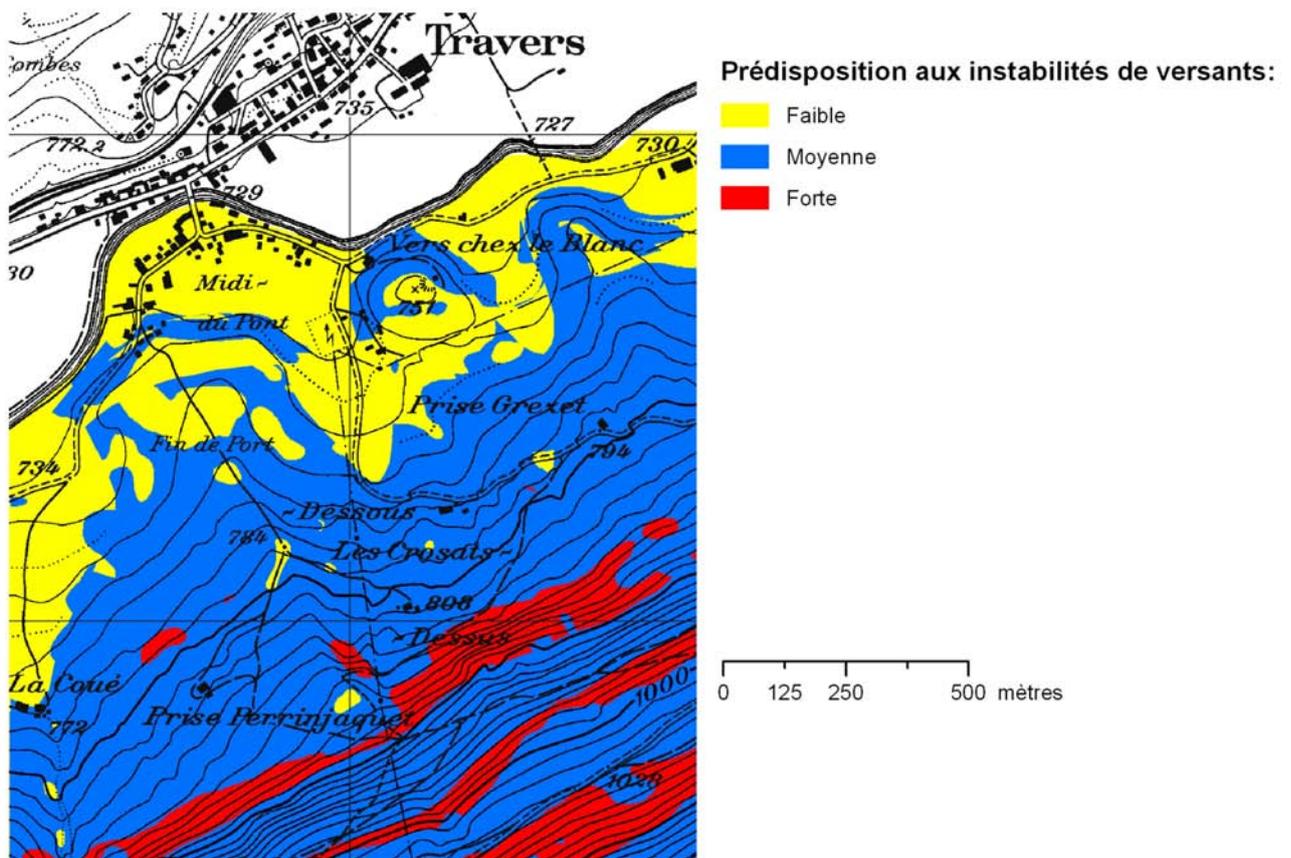


FIG. 2.21 – Carte de prédisposition aux instabilités de versants de Travers

La carte réalisée montre des zones de forte prédisposition aux instabilités de versants essentiellement dans la partie haute du secteur ; cette zone présente en effet de fortes pentes ainsi que des roches fissurées et des éboulis (cf. annexe 6). Il est plus intéressant de noter la présence de petits îlots de forte prédisposition dans la partie médiane du versant, et de constater ceux-ci sont situés immédiatement à l'amont des coulées observables sur l'image LIDAR. On remarquera également la

présence d'un polygone très susceptible aux instabilités entre la Prise Perrinjaquet et les Crosats-Dessus, dans une zone vierge de coulées mais présentant nettement des signes de faiblesses (petite niche d'arrachement, fentes...). Ces secteurs présentent en effet un substratum de molasse gréseuse altérée recouvert de moraine peu perméable (facteur hydrodynamique I important) associés à de fortes pentes.

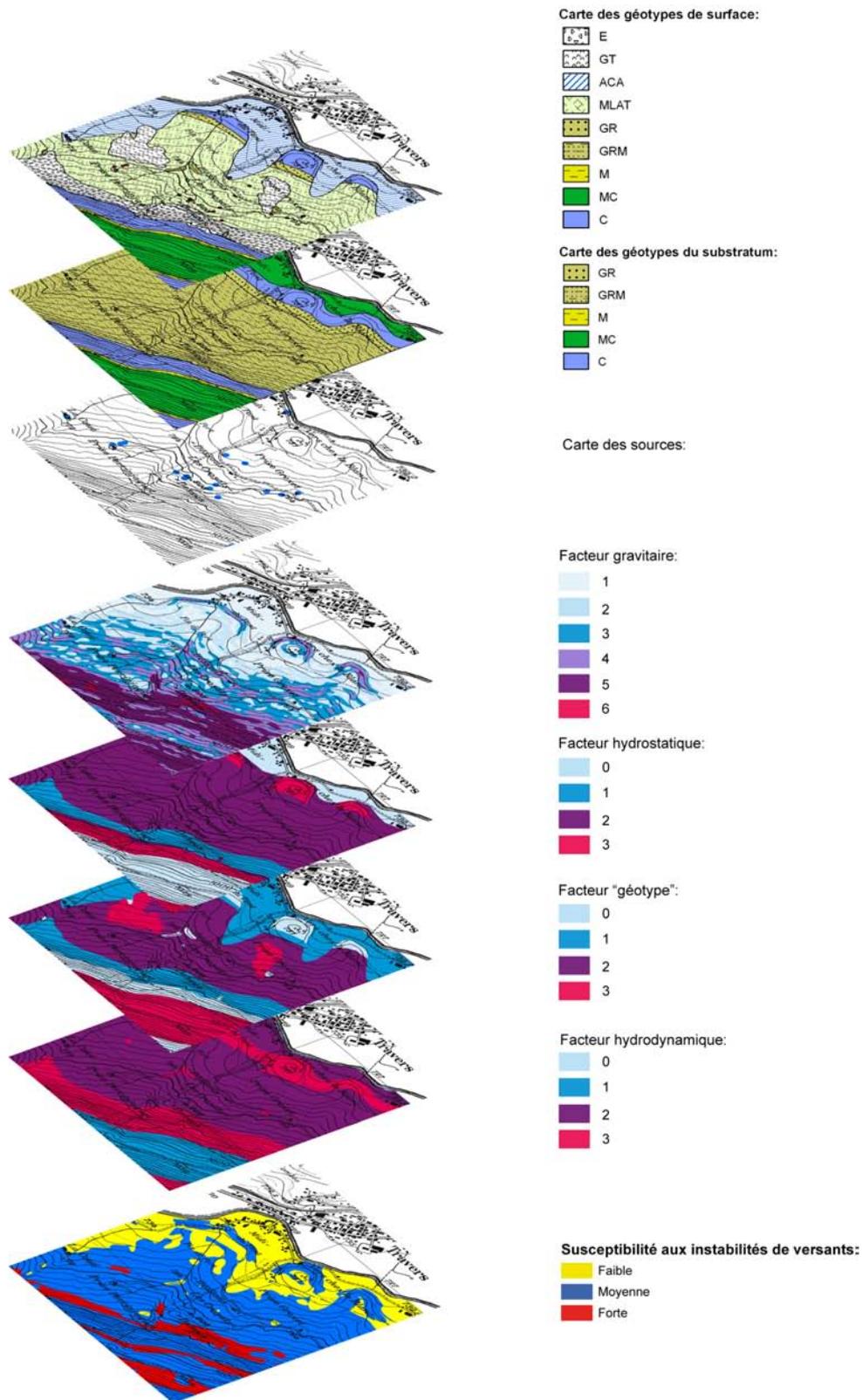


FIG. 2.22 – Etapes de la réalisation de la carte de prédisposition aux instabilités de Travers

4.2.2 Glissement et coulée de Villars-sur-Ollon

Contextes géographique et géologique

La commune de Villars-sur-Ollon, station de sports d'hiver haut de gamme des Alpes vaudoises, est située en rive droite du Rhône au sein des nappes de l'Helvétique (calcaires et marno-calcaires), du Pennique inférieur (cornieules et calcaires) et du Pennique moyen (flysch).

Description des phénomènes

Ce village est soumis à plusieurs types d'instabilités :

- une coulée de boue déclenchée vraisemblablement il y a plusieurs dizaines d'années, encore bien visible en amont du hameau de Chesières, et ayant entraîné des matériaux appartenant déjà à des masses glissées ;
- un glissement de terrain affectant le secteur de la Saussaz et mettant en mouvement des formations glaciaires et glacio-lacustres ainsi que des dépôts de pente ; ce glissement profond (quarante mètres d'épaisseur en moyenne) a occasionné d'importants dégâts aux bâtiments et aux routes.

Campagne de terrain

Les campagnes de terrain menées depuis 2005 ont montré que Villars-sur-Ollon présente de nombreux indices d'instabilités ; il s'agit en effet d'une zone très pentue, avec de nombreux bourrelets et niches d'arrachements. De plus, la couverture superficielle est en majorité constituée de masses en glissement et d'éboulis, avec quelques occurrences de moraine latérale rhodanienne (cf. annexe 7).

Ces dépôts morainiques ainsi que les terrains glissés sont à dominante matricielle et présentent des valeurs de bleu élevées (comprises entre quatre et cinq), ce qui en fait des matériaux très cohésifs et peu perméables. Seuls les dépôts échantillonnés en haut de la niche d'arrachement surplombant Chesières ont montré une granulométrie plus grossière (blocs et graviers quasi-omniprésents, avec une matrice essentiellement sableuse).

De plus, on a pu observer en contrebas de Plan Savoie des affleurements de flysch altéré, formation très propice aux glissements de terrain. Un important banc de cornieule est également visible non loin du chemin reliant Plan Chamois à la Berboleuse : la présence de roches gypsifères peut également être un important facteur de prédisposition aux instabilités de versants.

Enfin, on a noté la présence de nombreuses sources dans les bois dominant Chesières. Il a été difficile de distinguer des zones humides pérennes dans la mesure où les campagnes de terrain de ces deux dernières années se sont toutes déroulées soit sous la pluie, soit alors que le versant était encore enneigé.

Carte de prédisposition aux instabilités

La carte obtenue est assez satisfaisante, dans la mesure où la majorité des indices d'initiation d'instabilités (fentes, niches, etc) observés sur le terrain sont inclus dans les polygones de fortes prédispositions.

De plus, ces derniers couvrent bien les zones les plus actives du versant, alors que les polygones correspondant aux faibles prédispositions comprennent bien les zones visiblement plus stables.

On notera l'existence *a priori* d'une zone fortement prédisposée aux instabilités de versants dans la partie Est de la Saussaz : il serait intéressant de vérifier si ce secteur ne présente pas d'ores et déjà des indices d'instabilités.

- la partie médiane, ou Zone de Transit, d'activité soutenue (de cinquante centimètres à plus de deux mètres par an) ;
- la partie basse aujourd'hui peu active mais ayant accusé des déplacements de plusieurs dizaines de centimètres par an lors de la crise de 1998-1999, ce qui a causé d'importants dégâts dans le lotissement de Rohr situé au front du glissement.

Campagne de terrain

Les campagnes de terrain menées au Hohberg en mai 2006 ainsi qu'en juillet et août 2007 ont été rendues difficiles de par les conditions météorologiques particulièrement pluvieuses et le caractère souvent peu accueillant des autochtones. De plus, le versant a été largement remanié lors de la mise en place d'un réseau de drainage superficiel particulièrement dense.

Le Hohberg présente de nombreux signes d'instabilités :

- éboulis et guirlandes de solifluxion dans la zone supérieure (cf. annexe 9) ;
- alternances de zones concaves et convexes dans la partie médiane ;
- nombreux bâtiments et routes fissurés.

Les formations observées sont pour la plupart composées de matériaux fins à fortes valeurs de bleu (voisines de cinq), avec moins de 10% d'éléments grossiers (grès fins à matrice carbonatées dans la partie basse, calcaires légèrement marneux dans les parties hautes et médianes). Toutefois, on a pu observer dans le secteur d'Unter Guglera Hohberg (partie haute du versant, moitié Sud de celle-ci) de gros blocs de calcaires issus des Préalpes Médiannes Plastiques inclus dans une matrice visiblement peu argileuse (forte fraction de sables fins, valeur de bleu inférieure à 1).

Les affleurements de flysch étant très altérés, il n'a pas été possible de déterminer de quelconques valeurs de fracturation pour ceux-ci, alors qu'ils constituent la majeure partie du substratum du glissement. On devra donc se contenter des valeurs proposées par Tullen (2002) (K voisin de 10^{-7}m.s^{-1}).

Carte de prédisposition aux instabilités

La carte de prédisposition aux instabilités de versants obtenue est assez surprenante, dans la mesure où il s'agit de l'une des moins "alarmistes" de cette étude, alors que le Hohberg est à première vue l'un des sites les plus instables.

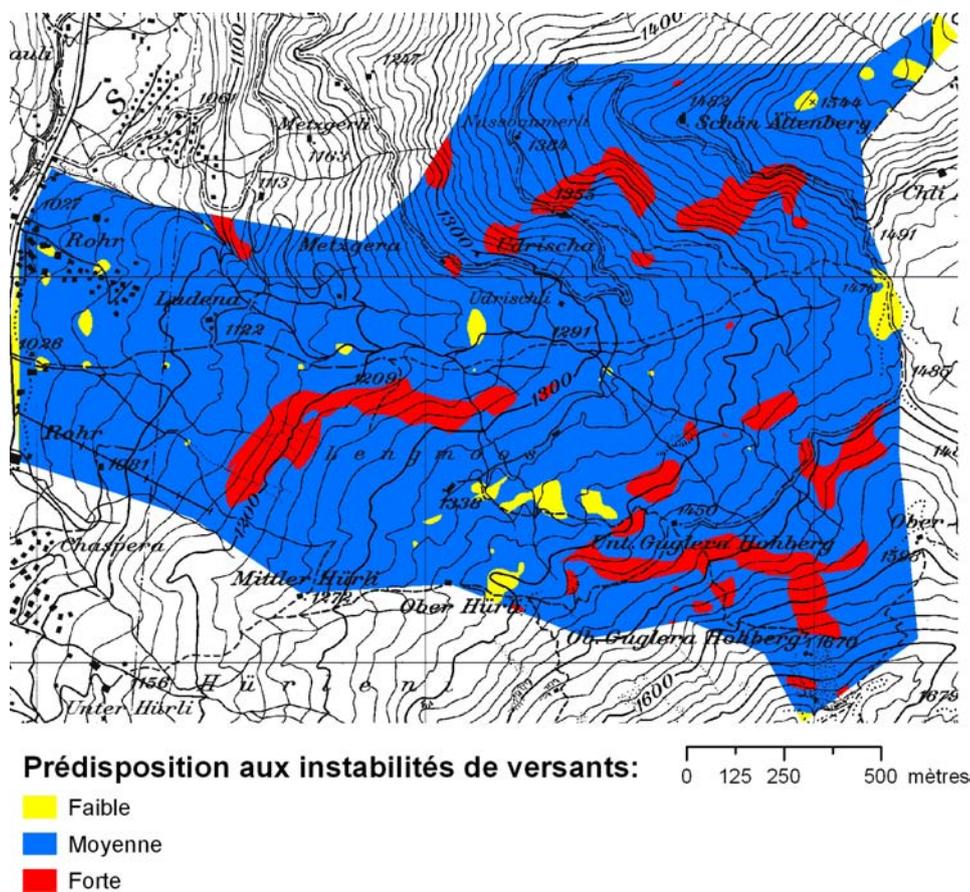


FIG. 2.24 – Carte de prédisposition aux instabilités de versants du Hohberg

Cependant, on notera que les zones classées comme fortement prédisposées aux instabilités correspondent bel et bien soit à des zones comptant parmi les plus actives du versant soit aux points d'initiation des lobes du glissement. De plus, la topographie du Hohberg, avec une alternance de zones concaves et convexes mais pas de réelle forte pente a engendré des notes gravitaires relativement faibles (cf. annexe 10) ; ces notes étant prépondérantes dans le calcul de la prédisposition aux instabilités, elles sont sûrement en grande partie responsable de "l'excès d'optimisme" de la carte obtenue.

4.2.4 Glissement de la Frasse

Contextes géographique et géologique

Le glissement de la Frasse affecte les communes de Leysin et d'Ormont-Dessous, dans les Alpes vaudoises, en rive droite de la vallée du Rhône. Il repose sur la nappe des Préalpes Médiannes et est majoritairement composé de dépôts de Flysch à helminthoïdes.

Description des phénomènes

Ce glissement profond et de grande ampleur (1,2 km², soit l'un des plus étendus du canton de Vaud) est particulièrement surveillé dans la mesure où son activité menace directement les accès routier et ferroviaire à la station de Leysin (déplacements de cinq à soixante centimètres dans la "Zone +" correspondant aux lieux-dits "Le Bay" et "La Frasse" à plusieurs dizaines de centimètres par an avec des pointes à près d'un mètre par semaine dans la "Zone ++" située au Fond de Cergnat) ; de plus, une accélération soudaine de la base du glissement pourrait aboutir à la formation d'un barrage naturel sur le torrent de la Grande Eau dont la débâcle menacerait alors la ville d'Aigle (Bourdin, 2003).

Un projet de construction de galerie drainante est en cours afin de diminuer l'activité de ce glissement (Association technique NCG-EPFL pour l'étude du glissement de la Frasse, 2006).

Campagne de terrain

Le secteur de la Frasse est en grande partie recouvert de terrains glissés (cf. annexe 11), et sa morphologie est typique des versants instables, avec de nombreuses alternances de zones concaves et convexes. Les matériaux prélevés dans la masse en glissement se sont tous avérés très argileux (entre 50 et 70% de fraction limono-argileuse à l'échelle de l'affleurement, avec des valeurs de bleu comprises entre 4.5 et 5.5), avec de très rares graviers et petits blocs de calcaire. La moraine de fond s'est également révélée très argileuse mais la fraction grossière y était plus importante (entre 20 et 30%). On peut donc considérer les formations superficielles comme imperméables et très cohésives. Le substratum est également observable en de nombreux points du versant ; les calcaires et marno-calcaires des Préalpes Médiannes affleurent notamment dans la partie haute du glissement, au niveau de la Roche Rouge ; ces calcaires présentent une forte densité de fracturation, on les classera donc comme très perméables. Il est également possible d'observer des affleurements de flysch très altéré en bord de route dans le secteur du Cerf. On a aussi pu constater la présence de cornieule (donc de roches à gypse) en aval du Sépey, ce qui est également un facteur prédisposant aux glissements de terrain.

On notera enfin la quasi omniprésence de sources et zones humides sur l'ensemble du versant.

Carte de prédisposition aux instabilités

La carte réalisée montre une très forte prédisposition aux instabilités en aval de Cergnat, soit au niveau des Zones + et ++, ainsi qu'en contrebas de la Roche Rouge, considérée comme l'un des points d'initiation du glissement de La Frasse. De plus, on voit que la route menant au Sepey et à Cergnat est bel et bien bordée de zones à forte prédisposition aux glissements sur une grande partie de son tracé. Enfin, on constate que l'ensemble du versant est globalement susceptible aux instabilités, conformément aux observations réalisées sur le terrain : cette carte est donc très satisfaisante.

4.2.5 Glissement de Montagnon-Produit

Contextes géographique et géologique

Le glissement de Montagnon-Produit se situe sur les côteaux de la commune de Leytron (Valais), en rive droite du Rhône. Avec une superficie de 2,7 km², il s'agit de la plus vaste zone instable du canton du Valais. Ce glissement profond (le plan de glissement principal est à plus de cent mètres de profondeur) entaille les schistes argileux de l'Aalénien, dans le flanc renversé de la nappe de Morcles (Helvétique).

Description des phénomènes

Le glissement de Montagnon présente une forte activité, avec des vitesses de déplacement supérieures à vingt centimètres par an, ce qui a causé d'important dégâts aux habitations ainsi qu'aux vignobles et à la route cantonale menant à la station de vacances d'Ovronnaz.

De nombreuses études ont été diligentées afin d'assainir ce versant ; elles ont notamment permis de mettre en évidence la présence d'aquifères captifs artésiens dans les quinze premiers mètres du substratum, au sein des schistes altérés et fissurés. Depuis, des travaux d'étanchéification du lit des torrents, des opérations de pompages dans les nappes captives ainsi que la mise en place de forages drainants ont été effectués afin d'abaisser les pressions d'eau au niveau de la semelle du glissement ; ils ont finalement abouti à une diminution notable de l'activité de celui-ci.

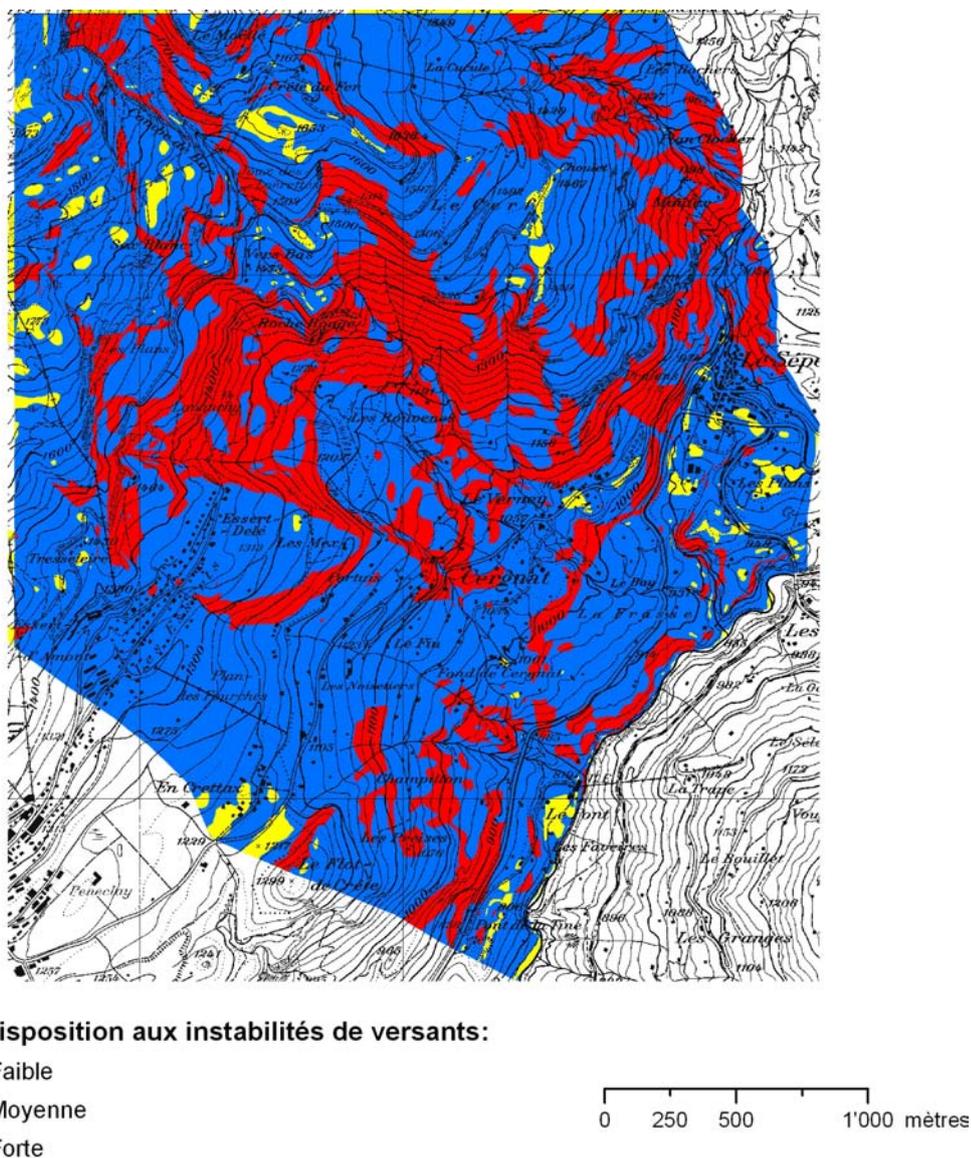


FIG. 2.25 – Carte de prédisposition aux instabilités de versants de La Frasse

Campagne de terrain

Les campagnes de terrain menées en mai 2006 et juillet et août 2007 n'ont permis de prélever d'échantillons "fiables" qu'en bordure du glissement, la partie centrale étant occupée par des vignobles et ayant été très remaniée. Pour cette même raison, il a également été difficile de repérer des indices géomorphologiques d'instabilités, à l'exception de la niche d'arrachement monumentale qui domine le glissement et des deux niches de moindre importance situées dans le secteur de Valeresse. Ces niches, bien qu'en grande partie végétalisées, ont montré des formations argileuses provenant vraisemblablement de l'altération des schistes aaléniens sous-jacents (et dont on retrouve quelques fragments sains dans la matrice). On a pu également observer en amont de Montagnon des affleurements de moraine de fond également très argileuse et comprenant environ 20% de blocs de calcaires striés (cf. annexe 13). La partie basse du versant présente quant à elle des dépôts alluviaux visiblement plus perméables mais qui n'ont pu être échantillonnés en vue d'une caractérisation plus précise (propriétés privées et périmètre à accès restreint autour de la station d'épuration).

En ce qui concerne les géotypes rocheux, les schistes aaléniens affleurants dans la partie haute du versant sont très altérés donc très perméables en surface, mais il est difficile d'en déduire la perméabilité en profondeur, la fracturation n'étant pas mesurable; on devra donc se baser sur les résultats des essais de pompages réalisés par le bureau Alpego en 2002-2003, et qui ont permis de mettre en évidence de très faibles perméabilités (de l'ordre de 10^{-8} m.s⁻¹). La falaise de l'Ardève

constitue un magnifique affleurement de marno-calcaires du Lias : un réseau de diaclases est observable au milieu de celle-ci ; on en a déduit une perméabilité moyenne à l'échelle du massif (de l'ordre de 10^{-6} m.s^{-1}).

La partie haute du versant présente de nombreuses sources et zones humides. Il en est peut-être de même en aval, mais les aménagements viticoles rendent difficile leur identification.

Carte de prédisposition aux instabilités

La carte de prédisposition réalisée les secteurs les plus susceptibles aux phénomènes d'instabilité se trouvent principalement dans la zone déjà active : la présence de formations peu perméables au-dessus d'un substratum fracturé engendre en effet un forte hausse du facteur hydrodynamique I (cf. annexe 14), comme l'ont d'ailleurs montré les forages de 2002-2003 ; ce secteur est par ailleurs très pentu. Le versant Est de l'Ardèche est lui aussi fortement prédisposé aux instabilités, et ce en grande partie de par ses reliefs escarpés. Enfin, on soulignera que le secteur du Four, situé en contrebas de Dugny et reposant sur de la moraine de fond actuellement considérée comme stable, pourrait être également sujet à des phénomènes d'instabilités.

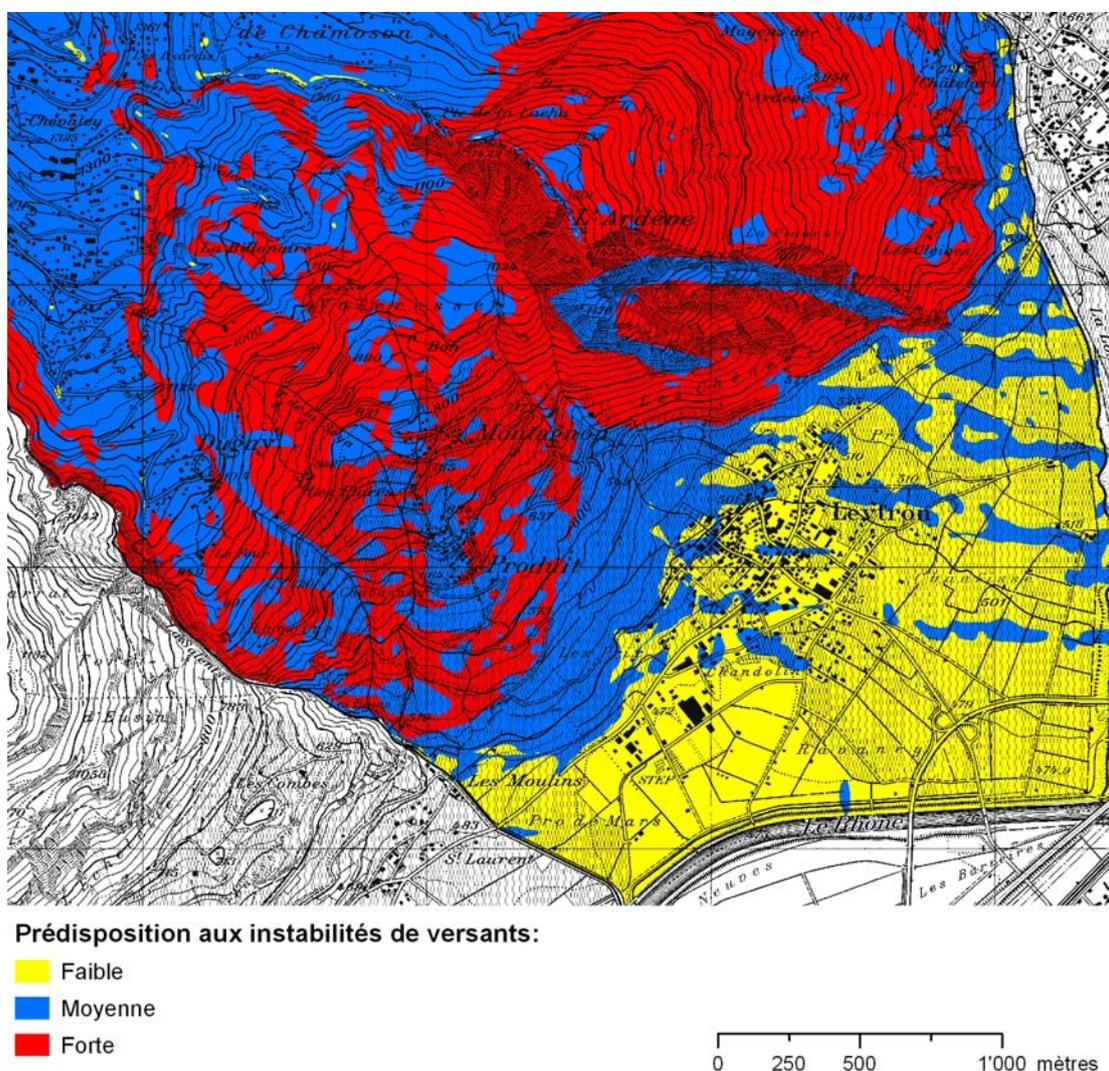


FIG. 2.26 – Carte de prédisposition aux instabilités de versants de Montagnon-Produit

4.2.6 Glissement-coulée de Fälli Hölli

Contextes géographique et géologique

Le glissement-coulée de Fälli Hölli est situé dans les Préalpes fribourgeoises, à cinq kilomètres en aval du Schwartzsee, dans la vallée voisine de celle du Hohberg. Il est au coeur de la nappe du Flysch du Gürnigel.

Description des phénomènes

Ce glissement de grande ampleur (environ 1.5 km² pour un volume de 33'000'000 de m³ de matériaux meubles en mouvement) peut être subdivisé en deux zones séparées par un seuil rocheux (Raetzo-Brülhart, 1997; Dapples, 2002; Oswald, 2003) :

- une partie haute présentant une activité soutenue mais régulière (déplacements supérieurs à dix centimètres par an) ;
- une partie basse aux déplacements également importants mais ayant par ailleurs présenté des pics d'activité catastrophique, avec des vitesses de déplacements supérieures à six mètres par jour ; lors de la crise de 1994, un lotissement de résidences secondaires s'est notamment déplacé de plus de deux-cents mètres en trois mois, ce qui a provoqué sa destruction.

Campagne de terrain

Les campagnes de terrain menées à Fälli Hölli en mai 2006 ainsi qu'en juin et août 2007 ont montré que ce versant est encore visiblement très instable :

- route d'accès déformée et fissurée ;
- nombreuses fentes de traction ;
- niches d'arrachement dénuées de végétation.

De plus, l'ensemble du secteur est très marécageux (on notera cependant que les trois campagnes de terrain ont eu lieu immédiatement après ou pendant des périodes pluvieuses), ce qui tend à montrer que l'eau ne s'évacue que difficilement dans ce versant.

Au niveau lithologique, les formations observées sont très homogènes, le flysch étant en effet omniprésent dans cette vallée (cf. annexe 15) ; les matériaux mobilisés lors de la crise de 1994 sont constitués de blocs de grès de taille décimétrique (environ 20%) englobés dans une matrice assez argileuse (valeurs de bleu comprises entre trois et quatre) issue de l'altération du flysch. Celui-ci est également visible de part et d'autre de la coulée, sous forme très altérée mais néanmoins en place.

Carte de prédisposition aux instabilités

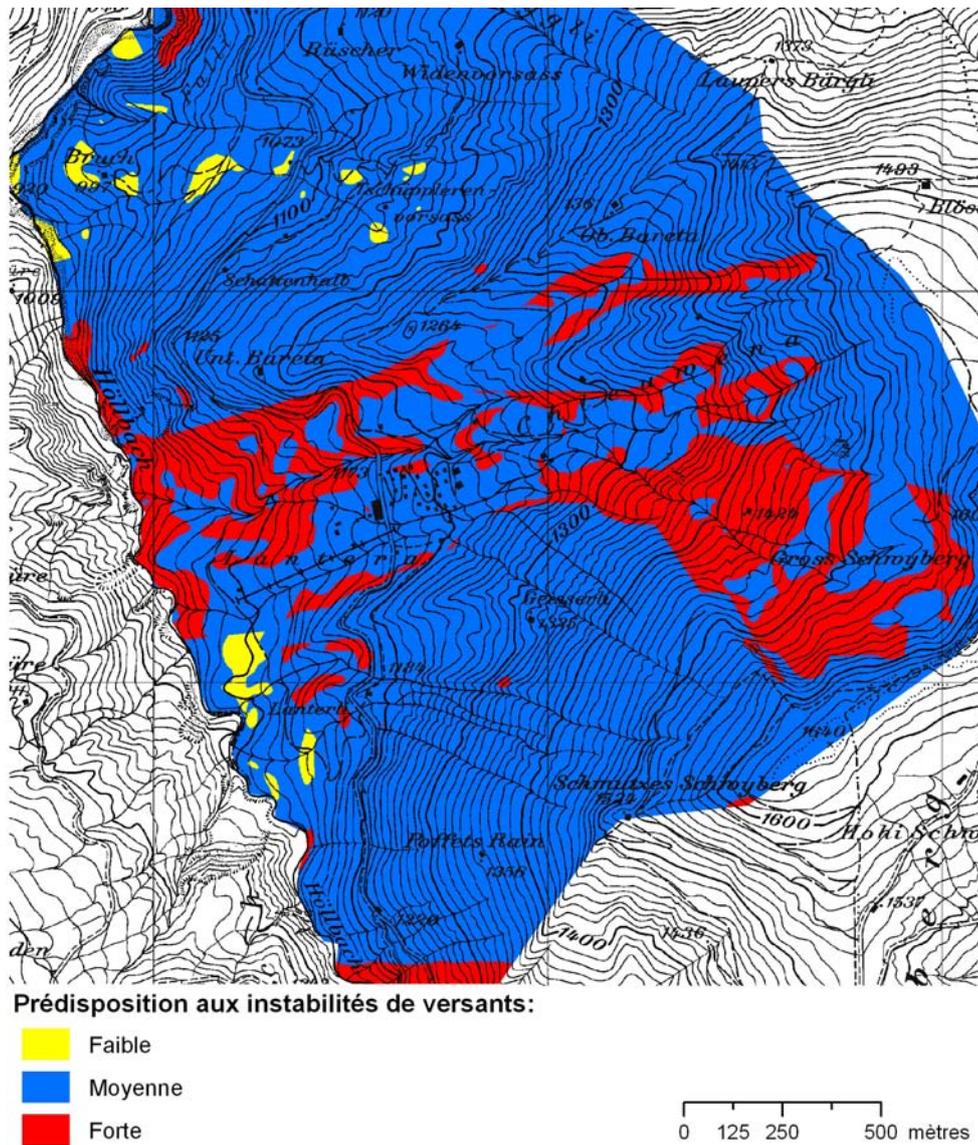


FIG. 2.27 – Carte de prédisposition aux instabilités de versants de Fälli-Hölli

La carte de prédisposition aux instabilités montre que les zones fortement susceptibles aux instabilités sont globalement cantonnées à l'actuelle zone instable. Cette prédisposition est bien sûr en grande partie due au géotypes (glissement de terrain et grès et schistes argileux), mais aussi à la forte de pente de ce versant (cf. annexe 16).

Quelques autres secteurs seraient visiblement aussi susceptibles de glisser, que ce soit dans la moraine ou dans la roche en place, la pente et le géotype étant cette fois encore les facteurs prédominants.

4.2.7 Coulée des Clées

Contextes géographique et géologique

La coulée des Clées se situe dans les gorges de l'Orbe, à huit kilomètres à l'Est de Vallorbe, dans le Jura vaudois. Elle appartient au domaine du Jura Plissé et repose notamment sur des calcaires du Portlandien, des marnes du Purbeckien et des marno-calcaires du Valanginien (en séries sub-horizontales).

Description des phénomènes

La coulée principale s'est déclenchée le 20 juin 2001, soit trois jours après que de violents orages

ne s'abattent sur l'ouest de la Suisse. Bien que de faible envergure (environ mille mètres cubes de matériaux déplacés), elle a été suffisamment violente pour emporter un monospace parqué deux-cents mètres en contrebas de la niche d'arrachement. Les constatations faites dans les heures qui ont suivi le phénomène ont permis d'évaluer la vitesse de la coulée à environ 10 m.s^{-1} , notamment en se basant sur l'observation d'éclaboussures sur les troncs d'arbres avoisinants jusqu'à près de deux mètres de hauteur.

Campagne de terrain

De nombreuses campagnes de terrain ont été diligentées aux Clées depuis avril 2006, l'analyse des échantillons ayant révélé une faille importante dans la méthode de caractérisation des formations superficielles meubles. En effet, on a pu constater que les matériaux mobilisés dans la coulée de 2001 ainsi que dans les dépôts de coulées plus récentes étaient des colluvions de sables (cela a été confirmé par les essais de sédimentométrie montrant une fraction limono-argileuse inférieure à 10% dans la matrice). Or, les essais au bleu de méthylène effectués sur des échantillons prélevés en contrebas de la niche d'arrachement principale, au coeur de la coulée, ont révélé des valeurs extrêmement fortes (comprises entre 5.5 et 6.5) ; afin de confirmer ces résultats, nous avons soumis quatre échantillons à un essai de laboratoire qui a également montré des valeurs de bleu élevées (de 4.5 à 5). Cependant, nous pouvons être quasi-certains que ces valeurs ne sont pas dues à la présence d'argiles. Des analyses sont en cours pour déterminer la teneur des échantillons en matière organique (bien que celle-ci ne soit pas visible à l'oeil nu), qui pourrait également adsorber de fortes quantités de bleu de méthylène. Si tel est le cas, et donc s'il est avéré que la présence de matière organique peut biaiser de façon considérable le résultat de l'essai au bleu, il faudrait mettre en place un protocole de détermination *in situ* de la présence de matière organique pour pouvoir décider s'il est judicieux ou non de procéder à l'essai au bleu.

Etant donné le fort pourcentage de sable dans la matrice, les matériaux de la coulée ont malgré tout été classés en "très perméables et très peu cohésifs".

De nombreuses sources jaillissent au bas de la niche principale ; la zone située immédiatement en contrebas de celle-ci est également très marécageuse. Ces eaux proviennent vraisemblablement de l'aquifère des sables et graviers fluvioglaciaires. Lors de fortes mises en charge, celui-ci doit se vidanger dans les colluvions peu cohésifs qui recouvrent le versant et emporter ceux-ci (facteur hydrodynamique II fort, cf. annexe 18).

Carte de prédisposition aux instabilités

La carte de prédisposition aux instabilités de versants montre que d'autres coulées sont susceptibles de s'initier dans ce secteur, vraisemblablement selon le même schéma que la coulée de 2001. En effet, on voit que le facteur hydrodynamique II est très important (matériaux de surface très peu cohésifs), et qu'il en est de même pour le facteur gravitaire.

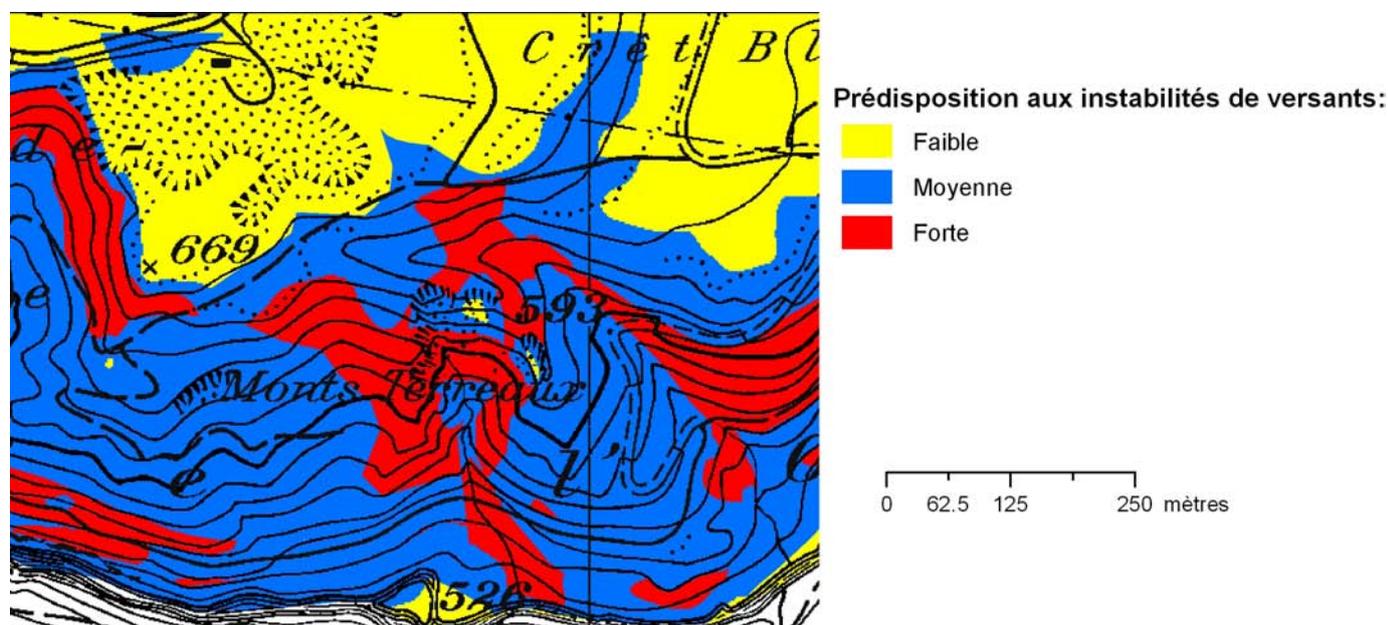


FIG. 2.28 – Carte de prédisposition aux instabilités de versants des Clées

4.2.8 Ovaile de Gondo

Contextes géographique et géologique

L'ovaille (terme helvétique désignant indifféremment tout phénomène catastrophique lié aux instabilités de versants dues à un apport massif et brutal d'eau) qui a dévasté Gondo (village du Haut-Valais situé à la frontière entre la Suisse et l'Italie) a sans doute été l'une des catastrophes naturelles les plus meurtrières de la Suisse au XX^{ème} siècle.

Le village est situé au coeur de la nappe des gneiss de l'Antigorio. Il n'a longtemps été soumis qu'à trois types d'aléas :

- inondation et érosion de berges, Gondo étant en effet situé au confluent entre la Doveria et la Grosses Wasser ;
- chute de blocs issus de l'imposante falaise qui domine le village ; celui-ci est par ailleurs en grande partie bâti sur un cône de déjection (cf. annexe 19), les forages réalisés dans le cadre d'un projet de creusement de tunnel n'ayant relevé aucune trace d'instabilité au sein de celui-ci. De plus, certains bâtiments dataient de plus de quatre siècles et ne présentaient jusqu'alors aucune trace de dommage lié à des instabilités de versants. Un piège à blocs avait néanmoins été construit en amont du village, au pied de la falaise.

Description des phénomènes

En octobre 2000, environ neuf-cents millimètres de pluie se sont abattus en moins de cinq jours sur Gondo, ce qui correspond à un événement de période de retour au moins millénaire, dont six-cents millimètres pour les seules journées des 13 et 14 octobre. L'eau s'est alors infiltrée et accumulée dans les sédiments très perméables formant le cône de déjection, formant une nappe souterraine temporaire. Deux phénomènes se sont alors additionnés :

- les forces de percolation ont tout d'abord destabilisé la base du cône, constitué de matériaux grossiers donc peu cohésifs, ce qui a engendré une première coulée ;
- ce matériel s'est alors accumulé derrière le piège à blocs dont les fondations étaient déjà fragilisées et qui, de plus, n'avait pas été dimensionné pour retenir une telle charge.

Les trois murs de béton de cinq cent tonnes chacun se sont alors renversés et ont été emportés par la coulée dont la vitesse a été estimée à trente mètres par seconde. L'ovaille a ainsi traversé le village, y faisant quatorze morts.

Evaluation de la susceptibilité aux instabilités de versants

Le village ayant entièrement été rénové depuis la catastrophe (réalisation d'un réseau de drainage superficiel et surtout revégétalisation intense et soignée dans laquelle il n'était pas de bon ton de creuser à la pelle ou à la tarière), il a fallu se contenter des photographies, rapports et témoignages de l'époque pour réaliser la carte des géotypes superficiels, la carte des sources et déterminer les unités géologiques homogènes.

Les matériaux apparaissant sur les photographies étant visiblement très grossiers, on les considèrera comme peu cohésifs et très perméables (de tels dépôts ont été observés également en pied de falaise en aval de Gondo, ce qui confirme cette hypothèse).

Carte de prédisposition aux instabilités

La carte réalisée pour le secteur de Gondo reflète assez bien les aléas auxquels est soumis le village. Il est frappant de constater que, comme l'avaient révélé les forages et comme le montraient également l'âge de certains bâtiments, la majeure partie de Gondo est bâtie sur l'une des seules zones peu prédisposée aux instabilités de cette vallée. De plus, on voit que les zones à fortes prédispositions présentent de très fortes pentes, un facteur hydrodynamique I très élevé (l'eau peut en effet facilement s'infiltrer dans les éboulis mais va s'accumuler au contact du substratum peu perméable) ainsi qu'un facteur hydrodynamique II également non négligeable (cf. annexe 20), les éboulis ne présentant aucune cohésion. Suite à un nouvel évènement pluviométrique majeur, il ne serait donc pas surprenant d'observer une nouvelle ovaille dans les zones "non-protégées" par le système de drainage.

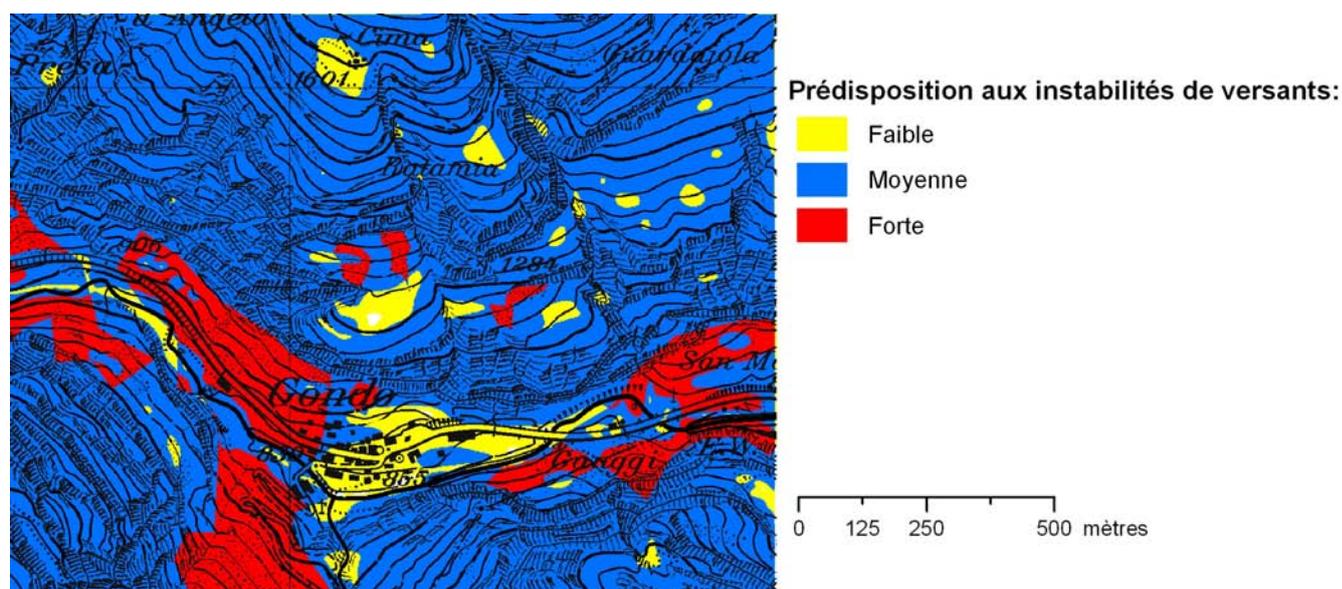


FIG. 2.29 – Carte de prédisposition aux instabilités de versants de Gondo

4.3 Synthèse

Les cartes réalisées pour les huit sites d'études sont globalement satisfaisantes, dans la mesure où les résultats obtenus ne montrent pas de contradictions notables avec les phénomènes observés (il serait ennuyeux qu'une zone très active dans la réalité soit classée "peu prédisposée aux instabilités de versants"). De plus, il est intéressant de voir qu'une seule routine a permis d'identifier non seulement des zones prédisposées aux glissements plastiques, mais également des secteurs plus susceptibles à des phénomènes de types "coulées".

La méthodologie testée constitue donc déjà une base solide pour la cartographie des zones prédisposées aux instabilités de versants.

5 Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de mettre en évidence l'importance des facteurs hydrogéologiques dans la prédisposition aux instabilités de versants, tout d'abord en théorie, puis en faisant intervenir ceux-ci dans la réalisation de cartes de prédisposition aux glissements et coulées.

Bien qu'elle n'en soit qu'à ses débuts, cette méthode semble prometteuse dans la mesure où les résultats obtenus sont d'ores et déjà satisfaisants et qu'elle respecte les objectifs fixés au préalable (transparence, rapidité, coûts modestes, etc).

De nombreuses améliorations sont encore à apporter :

- au niveau de la détermination des facteurs de prédisposition :
 - ajout d'autres facteurs de prédisposition aux instabilités : présence de gypse, orientation de l'anisotropie des formations, végétation, etc ;
 - quantification de la relation entre contrastes de perméabilités, pression de pore et stabilité (utilisation de modèles hydromécaniques) ;

- au niveau de la quantification *in situ* de ces paramètres :
 - quantification du pourcentage d'argiles ;
 - évaluation de la perméabilité du substratum à partir de données structurales et hydrochimiques ;
 - évaluation du rôle du substratum fissuré en cas d'évènement pluviométrique extrême ;
 - évaluation des accumulations d'eau dans le versant en fonction de la pente et des caractéristiques du substratum et des formations superficielles (utilisation de la plate-forme ATHYS et intégration du régime pluviométrique) ;

- au niveau de la réalisation de la carte :
 - meilleure exploitation du MNT (utilisation des données relatives aux rayons de courbure) ;
 - passage automatique de la granulométrie et/ou de la fracturation à l'UGH ;
 - discrétisation des UGHs dans l'espace (réalisation d'une interpolation entre les valeurs de granulométrie mesurées au sein de chaque polygone de géotype ; cette étape, bien que déjà réalisable, avait été abandonnée en raison de sa gourmandise en temps de calcul ; le passage à la version 9.2 d'ArcGis devrait permettre d'y remédier).

Bibliographie

- N. AL-SHAYEA : The combined effect of clay and moisture content on the behaviour of remolded unsaturated soils. *Engineering Geology*, 62:319–342, 2001.
- ASSOCIATION TECHNIQUE NCG-EPFL POUR L'ÉTUDE DU GLISSEMENT DE LA FRASSE : Entreprise de correction fluviale du glissement de la frasse. assainissement : projet d'ouvrage 2006. modèles hydrogéologiques et géomécaniques. Rapport technique, 2006.
- S. BADER et P. KUNZ : *Climat et risques naturels*. Georg ; Zürich : VDF, Genève, 1998.
- J.-P. BENABEN, N. DAC CHI et C. TOURENQ : Identification des argiles polluant les graves-ciments par le bleu de méthylène. *Bulletin de liaison du laboratoire des Ponts et Chaussées*, 164:5–15, 1989.
- S. BILGOT : Importance de l'indice de plasticité des formations superficielles dans la prédisposition aux instabilités de versants. Rapport de stage de master, 2006.
- V.V. BOGDANOV, I.I. and Mourzenko, J.F. THOVERT et P.M. ADLER : Effective permeability of fractured porous media in steady state flow. *Water Resources Research*, 39(1):1023, 2003.
- T. BOURDIN : Etude d'embacle-débacle de la Grande Eau en relation avec le glissement de La Frasse (Vaud, Suisse). Rapport de stage de diplôme d'études postgrades en géologie de l'ingénieur et de l'environnement, 2003.
- L.G. BROMWELL : The friction of quartz in high vacuum. *Phase Report 7, Research in Earth Physics, Contract Report 3-301, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.*, 1966.
- W. BURGER et M. J. BURGE : *Digitale Bildverarbeitung : Eine Einführung mit Java und ImageJ*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, mai 2006.
- R.H. CAMPBELL : Soil slips, debris flows, and rainstorms in the santa monica mountains and vicinity, southern california. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 851, 1975.
- F. DAPPLES : *Instabilités de terrain dans les Préalpes fribourgeoises (Suisse) au cours du Tardiglaciaire et de l'Holocène : influence des changements climatiques, des fluctuations de la végétation et de l'activité humaine*. Thèse de doctorat, Université de Fribourg, 2002.
- P. DESVARREUX : Reconnaissance géologique des mouvements de terrains. Stage ENCP, Stabilité des pentes, Grenoble, 1988.
- J.W. DICKEY : *Frictional characteristics of quartz*. Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 1966.
- J.-P. DUBÉ et Y. BARABÉ : *Guide technique sur la conception des installations septiques communautaires (petites agglomérations)*. SQAÉ et EAT environnement inc., 1991.
- S. ERSAHIN, H. GUNAL, T. KUTLU, B. YETGIN et S. COBAN : Estimating specific surface area and cation exchange capacity in soils using fractal dimension of particle-size distribution. *Geoderma*, 136:588–597, 2006.

- E. GERVREAU et J. L. DURVILLE : Quelques exploitations statistiques d'un fichier informatique de mouvements de terrain. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 48(1):33–42, Octobre 1993.
- H.M. HORN et D.U. DEERE : Frictional characterization of minerals. *Geotechnique*, 12(4):319–335, 1962.
- H. JOURDE, P. FENART, M. VINCHES, S. PISTRE et B. VAYSSADE : Relationship between the geometrical structural properties of layered fractured rocks and their effective permeability tensor. a simulation study. *Journal of Hydrology*, 337:117–132, 2007.
- L. KIRALY : Anisotropie et hétérogénéité de la perméabilité dans les calcaires fissurés. *Eclogae Geol. Helv*, 62(2):623–629, 1969.
- L. KIRALY : Notice explicative de la carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel. *Supplément du Bulletin de la Société Neuchateloise des Sciences Naturelles*, 96, 1973.
- J. LACUBE et J.-L. DURVILLE : Un essai de fichier informatique sur les mouvements de terrain. *Bulletin de liaison du laboratoire des Ponts et Chaussées*, 161:86–89, 1989.
- O. LATELTIN : Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Rapport technique, Office Fédéral de l'Environnement, 1997. Recommandations.
- J.-P. MAGNAN et G. YOUSSEFIAN : Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols. *Bulletin de liaison du laboratoire des Ponts et Chaussées*, 159:93–104, 1987.
- B. MATTI : Effects of the underground heterogeneities on the behaviour and the remediation of landslides. Thèse de doctorat, en cours, 2008.
- D. OSWALD : *Analyse de l'activité des glissements de terrain et relation avec les conditions climatiques : exemples dans les Préalpes fribourgeoises (Suisse)*. Thèse de doctorat, Université de Fribourg, 2003.
- A. PANTET : Valorisation des facteurs lithologiques et hydrogéologiques dans l'élaboration des cartes de dangers naturels. Rapport de stage de service civil, 2005.
- A. PANTET, A. PARRIAUX et P. THELIN : New method for in situ characterization of loose material for landslide mapping purpose. *Engineering Geology*, 2007.
- A. PARRIAUX et P. TURBERG : Les géotypes, pour une représentation géologique du territoire. *Tracés*, 15:11–17, 2007.
- M. POUYT : 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, 2004.
- D.B. PRIOR et L. DOUGLAS : Landslides near Larne, Co. Antrim, 15–16th August 1970. *Irish Geography*, 6:294–301, 1971.
- D.C. PROCTER et R.R. BARTON : Measurements of the angle of interparticle friction. *Geotechnique*, 24(4), 1974.
- H. RAETZO-BRÜLHART : *Massenbewegungen im Gurnigelflysch und Einfluss der Klimaänderung*. Thèse de doctorat, ETH Zürich, 1997.
- W RENWICK, R. BRUMBAUGH et L. LOEHER : Landslide morphology and processes on Santa Cruz island, California. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 64(3/4):149–159, 1982.
- RS814.201 : *Ordonnance sur la protection des eaux*, 1998.

- T. SCHNEIDER : Caractérisation multicritère des formations géologiques du canton de Vaud et de leurs prédispositions face aux dangers naturels. Rapport de stage de diplôme d'études postgrades en géologie de l'ingénieur et de l'environnement, 2001.
- SN-VSS : *SN 670 818 : Agrégats minéraux. Analyse par sédimentation selon Andreasen / EMPA.*, 1972.
- C. TOURENQ et T. N. LAN : Mise en évidence des argiles par l'essai au bleu de méthylène. application aux sols, roches et granulats. *Bulletin de liaison du laboratoire des Ponts et Chaussées*, 159:79-92, 1989.
- J.P. TRIPET : *Etude hydrogéologique du bassin de la source de l'Areuse*. Thèse de doctorat, Université de Neuchâtel, 1971.
- G.P. TSCHBOTARIOFF et J.D. WELCH : Lateral earth pressures and friction between soil minerals. *Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam*, 7, 1948.
- P. TULLEN : *Méthodes d'analyse du fonctionnement hydrogéologique des versants instables*. Thèse de doctorat, Geolep, EPFL, 2002.
- S.K. VANAPALLI et D.G FREDLUND : Comparison of different procedures to predict unsaturated soil shear strength. *ASTM Proceedings, Unsaturated Soils, Geo-Denver.*, 2000.
- A. VIEIRA DE MELLO : Validation de la cartographie des géotypes dans le but de l'évaluation du danger d'instabilités de versants. Rapport de stage de maîtrise de sciences de l'environnement, 2002.
- R. WAMYTAN : Essai de caractérisation lithologique in situ des formations géologiques du quaternaire pour la cartographie des dangers naturels. Rapport de stage de diplôme d'études postgrades en géologie de l'ingénieur et de l'environnement, 2003.

Annexes