



HAL
open science

Une approche des problèmes posés par l'étude des mouvements de terrain : essai méthodologique

Jean Pol Bombard

► **To cite this version:**

Jean Pol Bombard. Une approche des problèmes posés par l'étude des mouvements de terrain : essai méthodologique. Géologie appliquée. Université de Grenoble, 1968. Français. NNT : . tel-00687185

HAL Id: tel-00687185

<https://theses.hal.science/tel-00687185>

Submitted on 12 Apr 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3^{ème} CYCLE

Spécialité : Sciences de la Terre
Mention Géologie appliquée

PAR

Jean-Pol BOMBARD

UNE APPROCHE DES PROBLÈMES POSÉS PAR L'ÉTUDE DES
MOUVEMENTS DE TERRAIN — ESSAI MÉTHODOLOGIQUE

BIBLIOTHÈQUE
J. LETOURNEUR

Soutenue le 1968 devant la Commission d'Examen

MM.

R. BARBIER	Professeur	Président
R. MICHEL	—	Examineurs
J. BIAREZ	—	
P. ANTOINE	Maître-Assistant	

Doctorat de 3ème Cycle
N° d'ordre

THESE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES
DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3^{ème} CYCLE

Spécialité : Sciences de la Terre
Mention Géologie appliquée

PAR

Jean-Pol BOMBARD

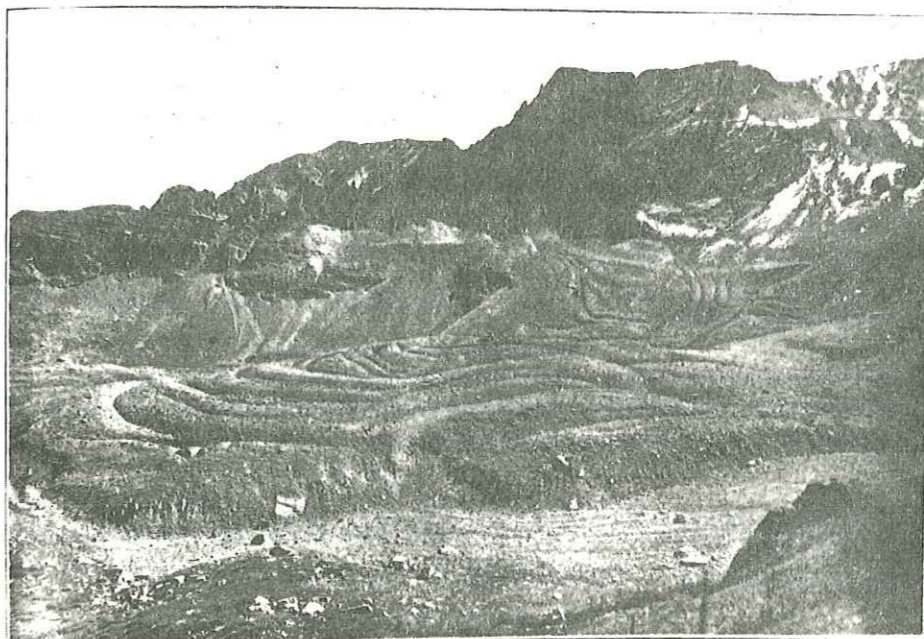
UNE APPROCHE DES PROBLÈMES POSÉS PAR L'ÉTUDE DES
MOUVEMENTS DE TERRAIN — ESSAI MÉTHODOLOGIQUE

BIBLIOTHÈQUE
J. LETOURNEUR

Soutenue le 7/12/1968 devant la Commission d'Examen

MM.

R. BARBIER	Professeur	Président
R. MICHEL	—	Examineurs
J. BIAREZ	—	
P. ANTOINE	Maître-Assistant	



Glacier rocheux (Rock Stream) dans les montagnes San Juan (U. S. A.)
(Photo E. HOWE).

Eboulis successifs ?

Nivations ?

Solifluxion ou Reptation ?

AVANT-PROPOS

La présentation de ce mémoire qui clôt le cycle de mes études universitaires me fournit l'occasion d'exprimer ma reconnaissance envers les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à son élaboration.

Mes remerciements iront en premier lieu à tous ceux qui furent mes professeurs au laboratoire de Géologie de Rennes et surtout à l'Institut Dolomieu; j'y associe également tous les maîtres-assistants, assistants et chercheurs qui dans la mesure de leur temps libre m'ont aidé.

J'exprime ma gratitude à M. BARBIER, professeur, qui m'a initié à la géologie appliquée et a bien voulu patronner cette thèse. Je n'oublierai pas non plus M. BIAREZ, professeur de mécanique des sols, qui m'a proposé ce sujet et a maintenu constamment mon esprit en éveil au cours de très fréquentes discussions, qu'il me pardonne si certains aspects qui lui sont chers ne peuvent figurer dans mon travail.

Je ferai une mention spéciale pour M. ANTOINE, maître-assistant en géologie appliquée dont les critiques judicieuses et l'enthousiasme sont à la base de toutes mes recherches; qu'il sache que mon amitié dépasse de loin le cadre des glissements de terrain et qu'elle ne saurait prendre fin avec ce mémoire.

Merci également à tous les techniciens du laboratoire pour la part active dans la réalisation de cet ouvrage, qu'il s'agisse de ceux chargés de l'impression d'un texte dépourvu du charme habituel des descriptions géologiques ou de Mlle FAVREAU, bibliothécaire, si souvent mise à contribution dans la "chasse" aux documents bibliographiques.

Ma reconnaissance va aussi à tous mes camarades géologues, mécaniciens du sol des services publics et privés, ainsi que les ingénieurs de diverses administrations qui ont accepté de me réserver un peu de leur temps et m'ont ouvert leur bibliothèque personnelle.

Il m'a été donné de pouvoir suivre pendant un an et demi le glissement de Léaz (Ain - retenue de Génissiat) avec ses chantiers de reconnaissances profondes. Je le dois à l'amabilité de MM. BAYARD, directeur du service exploitation de la Compagnie Nationale du Rhône, PONNELLE, chef de service, GARAUD, ingénieur; sans oublier ce cher M. HOULGATTE, topographe, basé à Génissiat, qui m'a aidé de ses observations pertinentes, qu'il me pardonne de lui avoir fait passer de froides journées d'hiver, l'oeil rivé à son théodolite.

Je terminerai en remerciant mes camarades du service hydraulique de la Direction Départementale de l'Agriculture de l'Isère et spécialement René BARTALA, chef du service et Jean DUBUS, hydrogéologue, qui avec la bienveillance de M. L. GARAVEL, ingénieur en chef, m'ont accueilli pendant près d'un an dans leur équipe et m'ont permis ainsi de continuer un travail que j'allais être contraint d'abandonner faute de moyens matériels. Ils m'ont initié aux finesses d'une autre discipline de la géologie appliquée et m'ont fait goûter à l'attrait inestimable du travail d'équipe et des contacts humains.

SOMMAIRE.

pages

AVERTISSEMENT AU LECTEUR.

CHAPITRE 1 : CLASSIFICATION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN.

I° - Classifications antérieures.	1
I°, A - Jusqu'à C.F. Steward SHARPE	2
I°, B - Classification de C.F.S. SHARPE	6
I°, C - Classifications récentes	7
II° - Principaux critères de classification.	14
II°, A - Les critères purement géologiques	14
II°, B - Les critères géomorphologiques et topographiques	18
II°, C - Les critères hydrogéologiques et climatiques	19
II°, D - Les critères mécaniques et dynamiques	20
II°, E - Les critères d'âge	24
III° - Essai de classification synthétique des glissements de terrain	24
III°, A - Les écroulements et éboulements	25
III°, B - Les glissements proprement dits	28
III°, C - Les coulées	40
III°, D - La solifluxion	45
III°, E - La reptation	53
III°, F - Conclusions.	57

CHAPITRE 2 : LES FACTEURS D'INSTABILITE.

I° - La pesanteur	59
II° - Facteurs géométriques externes	60
III° - Facteurs géométriques internes	66
IV° - Facteurs lithologiques, nature des matériaux	76
V° - Facteurs eau	87
VI° - Facteurs climatiques	107
VII° - Végétation	113
VIII° - Suppression de support	114
IX° - Vibrations	114
X° - Surcharges	116
XI° - Conclusions, mécanisme général	117

CHAPITRE 3 : MORPHOLOGIE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN.

I° - Les grandes formes d'ensemble	134
II° - Les formes de détail	141

CHAPITRE 4 : METHODE D'ETUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN - ESSAI METHODOLOGIQUE

Introduction	150
--------------------	-----

	Pages
I° - Description géologique régionale -----	157
II° - Description générale du site -----	157
II°, A - Localisation -----	157
II°, B - Géométrie actuelle du site -----	157
II°, C - Nature pétrographique et physico-chimique des matériaux -----	169
II°, D - Nature mécanique des matériaux -----	178
II°, E - Données climatiques et hydrogéologiques -----	182
II°, F - Histoire géologique du site -----	184
III° - Description précise du glissement -----	186
III°, A - Localisation du glissement et historique -----	188
III°, B - Géométrie du volume en mouvement -----	188
III°, C - Transformation des matériaux au cours et après le glissement -----	194
III°, D - Comportement hydrogéologique propre au glissement -----	194
III°, E - Cinématique du glissement -----	195
IV° - Causes probables du glissement -----	213
V° - Age et périodicité -----	214
VI° - Conclusions - prototype de fiche d'inventaire de glissement -----	215
<u>CHAPITRE 5 : UN EXEMPLE D'APPLICATION : LE GLISSEMENT DE LEAZ (Ain, retenue de Génissiat) -----</u>	<u>219</u>
<u>CONCLUSIONS GENERALES - PROSPECTIVES : ETUDES STATISTIQUES, CARTES DE POTENTIALITE DE GLISSEMENT. -----</u>	<u>262</u>

BIBLIOGRAPHIE.

LISTE DES TABLEAUX		Pages
N°		
1	- Classification de J. STINI -----	4
2	- Classification de K. TERZAGHI -----	5
3	- Classification de C. F. S. SHARPE -----	8
4	- Classification de W. H. WARD -----	9
5	- Classification de I. V. POPOV -----	12
6	- Classification de J. VARNES -----	13
7	- Différentes classifications adoptées suivant les auteurs -----	15
8	- Classification des vitesses de mouvement -----	23
9	- Vagues causées par des écroulements ou des glissements de roches -----	37
9 bis	- Dimensions de quelques avalanches d'écroulement et de glissement -----	42 bis
10	- Solifluxion avec franchissement de la limite de plasticité -----	51
11	- Solifluxion avec franchissement des limites de liquidité et de plasticité -----	52
12	- Valeurs de pente pour quelques glissements -----	61
13	- Pente de la surface topographique en relation avec la pente des couches dans le Condroz (Belgique) -----	62
14	- Variations de l'épaisseur moyenne des strates et position de la surface de glissement dans le site du barrage de Vajont -----	68
15	- Valeurs de pendages de couches pour quelques glissements de roches -----	71
16 a	- Extension de chaque formation et longueur de faille dans les montagnes de la rivière Monobe -----	74
16 b	- Nombre de glissements de roches sur les versants de la rivière Monobe -----	75
16 c	- Nombre de glissements de roches par kilomètre de faille dans le secteur d'étude faillé -----	75
17	- Perméabilité des argiles et des mélanges argile-sable -----	78
18	- Valeurs de gonflement libre pour divers minéraux argileux -----	81
19	- Quelques valeurs de trois des paramètres caractéristiques des argiles sensibles -----	86
20	- Quelques cas de rupture de barrages en terre lors de vidange -----	97
21	- Pluviométrie en mm sur les régions environnant les zones des glissements de Roquebilière - Serrières en Chautagne - Menton -----	109
22	- Facteurs contribuant à augmenter la contrainte de cisaillement -----	118
23	- Facteurs contribuant à diminuer la résistance au cisaillement -----	119
24	- Mécanismes des glissements de terrain d'après K. TERZAGHI -----	130-131
25	- Répartition des fissures dans les différents types de mouvements -----	145
26	- Formes et indices caractéristiques des glissements actifs -----	147
27	- Formes et indices des mouvements superficiels et lents -----	148
28	- Caractéristiques granulométriques des versants et des matériaux formant le manteau de débris -----	163
29	- Seuils granulométriques dans différents pays -----	164
30	- Classification des sols grenus -----	166
31	- Classification rapide des sols grenus -----	167
32	- Comportement de quelques roches vis à vis du gel et de la corrosion chimique -----	175
33	- Gélivité des sols graveleux et sableux -----	176
34	- Gélivité des sols fins -----	177
35	- Valeurs d'activité de certains sols -----	180
36	- Origine des surfaces de glissement -----	191
37	- Vitesse et durée des mouvements pour quelques glissements -----	209
38	- Méthodologie d'étude des mouvements de terrain -----	217 et 218
	Fiche simplifiée d'inventaire de glissement de terrain (4 pages)	fin du chapitre 4

N°		Pages
39	- Identification minéralogique de quelques échantillons d'argile et de marnes du glissement de Léaz. -----	231
40	- Premiers essais mécaniques d'identification sur quelques échantillons pris dans la région de Léaz. -----	233
41	- Epaisseurs et cotes des différents volumes de matériaux du glissement de Léaz. -----	241
42	- Mesures de déformation de tubes plastiques équipant les sondages S. M. 1 bis à S. M. 5 dans le glissement de Léaz. -----	254
43	- Déplacements horizontaux de quelques témoins, glissement de Léaz -----	255

LISTE DES FIGURES

N°		Pages
1-2-3-4	- Nomenclature de L. MULLER, densité de fracturation -----	17
5	- Eroulement par affouillement -----	26
6	- Eroulement par "foirage" de couches tendres -----	26
7	- Action de la pression hydrostatique ou du gel -----	26
8	- Différents types de "slump" -----	31-32bis
9	- "Slumps" multiples dans des graviers et argiles varvées formant les berges du lac F. D. ROOSEVELT -----	32
10	- Glissement de blocs du type Angara d'après N. I. SOKOLOV -----	36
11	- Glissement de blocs du type labyrinthoïde -----	36 bis
12	- Glissement de blocs du type Ilim -----	36 bis
13	- Glissement rétrograde -----	39
14	- Glissement "progressif" -----	39
15	- Coulées de Bellevaux (Hte-Savoie) -----	43
16	- "Mudflow" de Slumgullion (Montagnes San Juan - U. S. A.) -----	46
17	- Solifluxion avec bombement, cas particulier de la cuesta calcaire sur marnes -----	49
18	- Solifluxion à déchirures et griffures -----	49
19	- Décollement par paquets successifs -----	49
20	- Relations entre la pente du versant et la vitesse de mouvement dans des débris de schistes -----	54
21-22	- Processus de contraction - expansion - désagrégation -----	56
23	- Principaux types de glissements observés par J. N. HUTCHINSON -----	64
24	- Principaux types de glissements observés et leurs relations avec la pente du talus -----	65
25	- Fauchage de couches -----	70
26	- Influence de la stratification sur la stabilité des talus -----	70
27	- Influence de la pente de la stratification sur la stabilité des talus -----	72
28	- Perméabilité des argiles en fonction de l'indice de vide -----	79
29	- Influence des cations échangeables sur la perméabilité sous charge de la kaolinite et de la montmorillonite -----	82
30	- Relation entre la structure et la composition des argiles et les vitesses de gonflement dues au gel -----	82
31	- Influence de la nature de l'argile sur le gonflement dû au gel -----	82
32a	- Courbes d'absorption d'eau pour l'attapulgite et montmorillonite Ca et Na -----	83
32b	- Courbes d'absorption d'eau pour les kaolinites et les illites -----	83
33	- Pourcentage de gonflement pour des mélanges argile -sable -----	83
34	- Forme courante des glissements en argile sensible -----	85
35	- Circulations d'eau dans un talus -----	88

N°		Pages
36	- Directions d'écoulement dans un talus -----	88
37	- Graphique des hauteurs des grandes crues de la Moskova et glissements enregistrés sur les Monts Lénine -----	90
38	- Graphiques de l'érosion de la berge par la rivière et des glissements liés à cette érosion -----	91
39	- Influence du niveau d'eau sur les mouvements de terrain dans la région de Kamiya, Japon -----	93
40	- Relation entre la position de la nappe sous la surface et les déplacements horizontaux -----	93
41	- Plan de situation d'une galerie de mise en charge d'après J. STINI -----	95
42	- Glissement au point C 2 (d'après J. STINI et figure 41) -----	95
43	- Abaques de stabilité des talus de digues en terre lors de vidange -----	99
44	- Fréquence de glissements dans les berges du lac F. ROOSEVELT -----	100
45	- Glissement de Vajont-Longarone - vitesse de mouvement en mm/jour -----	102
46	- Relation entre le niveau de la retenue de Vajont-Longarone, de la position de la nappe dans les puits P 1 et P 2 et les précipitations -----	104
47	- Influence de la hauteur d'eau de la retenue et du mouvement de la pente sur la stabilité de celle-ci : vallée de Kauner (Autriche) -----	106
48	- Influence des précipitations sur les vitesses de mouvement -----	108
49a	- Fréquence des chutes et glissements en Norvège -----	110
49b	- Influence de la position de la nappe sur la stabilité des talus en pente raide -----	110
50	- Effets gonflants du gel, leurs influences sur les mécanismes de reptation -----	112
51	- Effets des tremblements de terre sur les versants -----	115
52	- Mécanisme général de glissement d'après K. TERZAGHI -----	121
53	- Variations du coefficient de sécurité avant glissement -----	122
54	- Variations du coefficient de sécurité dans le cas du glissement de Franck -----	124
55	- Variations du coefficient de sécurité en fonction du temps pour le glissement de Furre -----	125
56	- Forme générale d'un glissement du type "slump" -----	133
57	- Glissement de Vajont-Longarone, hypothèse d'un ancien glissement -----	136
58	- Coupe schématique d'un glissement ancien d'âge géologique -----	136
59	- Evolution d'un talus rocheux abrupt -----	137
60a	- Topographie en graben et horst dans un "slump" -----	139
60b	- Représentation schématique d'un glissement de bloc ou de masse rocheuse -----	139
61 et 62	- Principaux types de fissures et crevasses -----	143-144
63	- Formes de détail des joints de stratification -----	160
64	- Seuils granulométriques de susceptibilité au gel (sols morainiques en Norvège) -----	173
65	- Glissement de Vajont-Longarone, relation entre le pendage des couches et celui de la surface de glissement -----	193
66	- Sonde de solifluxion de Williams -----	198
67	- Enregistrement fourni par une sonde équipée de deux paires de jauges -----	198
68	- Quelques types de témoins de mouvements -----	201
69	- Différents types d'implantation de réseau de contrôle topographique -----	201
70	- Données fournies par les inclinomètres à résistance -----	204
71	- Courbe d'étalonnage TELEMAT -----	204
72	- Représentation des données enregistrées par des inclinomètres -----	210
73	- Principaux types de courbes de déplacement en fonction du temps -----	210
74	- Rapport entre le temps de rupture par fluage et la vitesse de déformation -----	212
75	- Rupture d'un mur de la route d'Ooigawa (Japon) -----	212
76	- Situation du glissement de Léaz -----	221
77	- Carte géologique des environs du glissement de Léaz -----	224
78	- Etat du glissement de Léaz au 14/4/1947 ; vue des bourrelets de la partie supérieure -----	237
79	- Morphologie du glissement de Léaz -----	239
80	- Fissures et crevasses transversales dans le glissement de Léaz -----	240
81	- Fissure longitudinale dans le glissement de Léaz -----	240
82	- Coupes géologiques du glissement de Léaz -----	243
83	- Coupes géologiques du glissement de Léaz -----	244

N°		Pages
84	- Courbes de niveau du mur de l'argile grise dans le glissement de Léaz -----	246
85	- Etat de fracturation des marnes bigarrées prélevées dans les sondages S.M. 2, S.M. 4 ---	248
86	- Réseau de contrôle topographique du glissement de Léaz -----	251
87	- Déplacements horizontaux en fonction du temps pour quelques témoins -----	256
88	- Histogrammes des fréquences relatives des déplacements horizontaux pour les années 1965 - 1966 - 1967 -----	257
89	- Mouvements horizontaux, trajectoires des mouvements horizontaux dans le glissement de Léaz -----	259-259bis
89 bis	- Vecteurs de mouvements -----	260

- AVERTISSEMENTS AU LECTEUR -

Ce mémoire est divisé schématiquement en deux grandes parties.

- La première partie (chapitres 1-2-3) consiste essentiellement en une mise au point des aspects généraux des mouvements de terrain, que de nombreux auteurs en grande partie étrangers, depuis la fin du siècle dernier, ont traité et mis en valeur de façons différentes selon leur spécialité propre. Un tour d'horizon le plus complet possible a été effectué. Mais nous n'avons pu malheureusement, pour diverses raisons et en particulier d'ordre linguistique, faire état des travaux russes et japonais figurant certainement parmi les plus intéressants, et les plus complets, parce que vus sous l'angle statistique et numérique et aboutissant à des conclusions pratiques, fruits de longues recherches en équipe. Il est certain que la traduction de ces travaux les plus récents rendra elliptiques voir caduques certaines de nos conclusions.

Devant la diversité des opinions, le manque d'études statistiques et des résultats trop partiels, nous avons été contraint de faire tout d'abord un tri, puis une redistribution plus simple et plus souple des faits d'observation, ceci à la lumière de réflexions et d'observations personnelles et à la suite d'entretiens avec des personnes d'horizons scientifiques les plus divers. Nous aboutissons ainsi à une sorte "d'avant-projet" de classification synthétique descriptive avec en regard l'énumération des nombreux critères utilisables dans divers types de classification (chapitre 1). Quelques tableaux aideront le lecteur à se faire rapidement une idée sur ces questions.

Il ressort clairement que la théorie "argile + eau + cercle de glissement = causes de glissement" était par trop simpliste. Ceci a motivé notre deuxième chapitre en cours duquel nous passons en revue les principaux facteurs d'instabilité avec leur modalité d'action. Précisons toutefois, qu'à défaut d'étude statistique poussée, nous ne pouvons proposer une hiérarchie des degrés d'influence de ces différents paramètres d'instabilité dans une région donnée, notion pourtant essentielle si l'on veut essayer de prévoir et d'analyser l'évolution d'un versant.

Après avoir retenu une classification de type descriptif, car la plus commode, semble-t-il, dans l'état actuel de nos connaissances, il était indispensable de retracer brièvement les formes courantes que l'on peut observer dans un versant instable. Leur connaissance, même approchée, doit permettre au géologue de détecter les zones douteuses et de mettre l'accent sur les dangers qu'il y a de construire sans tenir compte de tels indices irréfutables. Le tableau qui clôt ce chapitre et les figures qui y sont insérées aideront le lecteur à se faire une opinion sur les indices de glissement. Nous aurions aimé pouvoir en faire une espèce de charte visuelle, mais des difficultés matérielles ne nous ont pas permis de réaliser ce souhait.

Cette première partie avait pour but de clarifier certaines idées et de les rendre utilisables dans la pratique, notamment dans le domaine du vocabulaire.

- Partant de ces données, nous avons essayé, dans une deuxième partie, (chapitres 4 et 5) de mettre sur pied une méthodologie d'étude des glissements, indispensable à l'analyse comparée de mouvements de terrain de types les plus divers. Différentes études concrètes effectuées par nos soins, nous ont permis de définir une "philosophie" et un certain nombre de réflexes qu'il est souhaitable de posséder en abordant un problème de stabilité. Pour ce faire, nous proposons quelques détails pratiques destinés à faciliter les observations et les investigations d'ensemble et de détail, en nous référant aux nombreuses techniques des sciences de la terre, que nous considérons comme autant d'outils précieux pour une meilleure compréhension. Cet essai méthodologique ne se veut pas rigide, et il est susceptible de nombreux aménagements. La fiche d'inventaire annexée au chapitre 4 ne peut être considérée non plus comme statique ; elle demande à être mise au point à partir de cas les plus divers.

Le lecteur s'étonnera peut-être du tour elliptique que nous avons donné à la partie proprement mécanique. Nous l'avons fait intentionnellement, non par chauvinisme, mais parce que le mécanicien du sol demande avant tout au géologue d'être un fin observateur et un bon historien (au sens géologique) dont les conclusions pourront être

exprimées sous forme numérique et rentrer dans le cadre d'équations générales. Etant entendu que le géologue doit pouvoir parler un langage compréhensible, adapté aux contingences intellectuelles et matérielles des techniciens (ingénieurs de conception et d'exécution) qu'il a la charge d'alerter et d'éclairer sur un problème quelconque de glissement.

Enfin, nous espérons que notre modeste contribution dépassant en longueur, les normes établies, permettra à l'équipe de recherche qui nous succédera de rentrer immédiatement plus avant dans le vif du sujet.

Nous laissons cependant la porte ouverte aux critiques et aux aménagements de toutes sortes, étant persuadé que notre travail ne saurait être seulement le point final de deux ans de recherches, mais plutôt un nouveau stade dans la longue acquisition de cette maturité d'esprit particulière que doit posséder tout "géologue appliqué".

CHAPITRE I.

CLASSIFICATION DES MOUVEMENTS DE TERRAIN

I°. - CLASSIFICATIONS ANTERIEURES.

II°. - CRITERES POSSIBLES DE CLASSIFICATION.

III°. - EBAUCHE DE CLASSIFICATION.

Il nous semble essentiel, avant d'en entreprendre l'étude précise des causes, formes et moyens d'étude, de classer les différents phénomènes que l'on groupe habituellement sous le terme très général de mouvements de terrain.

Pour ce faire, nous rappellerons sommairement les nombreux travaux antérieurs existants dans ce domaine. La diversité des classifications utilisées nous conduira à énumérer un certain nombre de critères utiles à un essai de classement.

L'ébauche de classification que nous proposerons à la fin de ce chapitre ne saurait, en aucun cas, être prise en valeur absolue puisqu'elle n'a pu être étayée sur des études statistiques rigoureuses et qu'elle fait abstraction, pour des raisons d'ordre linguistique, des travaux très importants effectués par les géologues russes au cours de ces vingt dernières années. Néanmoins, elle nous permettra de définir une terminologie précise, nécessaire à tout travail d'équipe géologues - mécaniciens du sol et nous servira de référence à toutes les questions soulevées par l'étude des mouvements de terrain : causes, mécanismes, formes, remèdes.

I°. - CLASSIFICATIONS ANTERIEURES

- A - Jusqu'à C.F. Steward SHARPE.
- B - Classification de C.F. Steward SHARPE.
- C - Classifications récentes.

- A - JUSQU'A C.F. STEWARD SHARPE.

Quelques grands noms de la géologie et de la mécanique des sols "commençante" ont proposé au cours de cette période, différentes classifications des mouvements de terrain.

Nous citerons brièvement et dans l'ordre chronologique :

A, 1. - Albert PENCK en 1894, différencie deux processus de base :

a) les "mouvements de masses" (mass-movements) ayant lieu sous la seule influence de la pesanteur et sans l'aide d'un transport quelconque. PENCK groupe sous cette définition deux types de mouvements :

- les mouvements dans les masses meubles et les glissements proprement dits. (Bergstürze)
- les coulées ou "mouvement d'érosion", (Abspülung)

b) les "transports de masses" (mass-transport) impliquant un entraînement de matériaux dans un milieu transporteur tel que l'eau, l'air, la glace.

A, 2. - David MOLITOR en 1894, propose une des premières classifications figurant dans la littérature américaine. Elle est fondée essentiellement sur les causes de glissements (2).

Il distingue :

a) les glissements se produisant sur un versant trop pentu pour qu'il y ait équilibre durable ; la rupture implique l'existence d'une surface de glissement plus ou moins bien définie.

b) les glissements dus à l'inclinaison des couches et à la "lubrification" du terrain.

c) les glissements causés par la seule action de l'eau (coulées).

d) les glissements où le terrain sous-jacent est incapable de supporter le poids des terres.

A, 3. - Pour Ernest HOWE (1909), les résultats d'une étude des glissements de terrain dans les montagnes San Juan du Colorado (U.S.A.), lui permettent de classer les mouvements suivant le type de matériaux,

a) les mouvements dans les sols, débris terrains meubles.

- glissement lent - coulées lentes - reptation.
- glissement de sol et coulée rapide.
- coulée de vase (mudflow).
- glissement d'éboulis.
- glissement ayant lieu sous l'eau.

b) les mouvements dans les roches.

- glissement de roches.
- écoulement de roches.

c) les mouvements affectant à la fois les roches et les débris.

d) les mouvements divers.

- glissements artificiels.
- affaissements de sols.

(1) - PENCK Albert : "Morphologie der Erdoberfläche" 2 volumes, 471 et 696 pp. Stuttgart, J. Engelhorn, 1894.

(2) - MOLITOR David : "Landslides" Assoc. Eng. Soc., Jour., Vol. 13, p. 12-32, 1894.

A, 4. - Roberto ALMAGIA (1910), en Italie propose d'abord une définition scientifique du mot "frana" terme technique adopté par des géographes allemands et français ; dont la signification ne correspond pas dès lors à celle qu'elle a généralement en Italie.

"La frana est une forme accélérée ou catastrophique de la démolition subaérienne, qui est toujours la conséquence plus ou moins directe de l'action de la pesanteur."

La classification d'ALMAGIA repose surtout sur le type et l'importance du mouvement, il parle ainsi de :

a) glissement assez étendu et superficiel atteignant seulement les couches supérieures du terrain, que l'eau, après les avoir envahies et imbibées, entraîne sur les pentes. ALMAGIA emploie le terme de "lame" utilisé communément dans toute l'Italie centrale. Si la pente est forte et l'eau abondante, on passe alors au torrent de boue désigné par le terme allemand "Muren" avec des correspondances françaises et italiennes diverses : "boe" ou "maré" dans les Alpes vénitiennes, "nant sauvage" en Savoie ou encore "lave".

b) "éboulement par affaissement" (frane per cedimento) ou mouvement profond de coulée ; c'est en fait l'exagération du type précédent. On peut les diviser suivant l'auteur en mouvement dans la roche solide en place et en mouvement dans les débris.

c) glissement de roches sur un plan défini ou "éboulement par glissement" (frane per scivolamento).

d) "éboulement par roulement" (frane per rotolio), ce type représente l'écroulement de roches dû à l'action du gel ou du dégel.

e) "éboulement par écroulement" ou écroulement (frane per crollo).

A, 5. - J. STINI (1910), étudie le rôle de la pesanteur dans les mouvements de terrain, il distingue ainsi : (voir tableau n° 1)

a) les mouvements où la pesanteur agit directement comme dans les écroulements.

b) les mouvements où la pesanteur agit indirectement : les coulées.

A, 6. - Karl TERZAGHI en 1925, propose une classification fondée sur les propriétés physiques des matériaux (1) (voir tableau n° 2). On retiendra les deux grandes distinctions suivantes :

a) les mouvements se produisant à sec : mouvements de sol.

b) les mouvements impliquant une déformation plastique : mouvements de débris.

Il mentionne aussi la reptation et différentes sortes de coulées boueuses du type mudflow ; mais il passe sous silence tout ce qui a trait à la solifluxion.

A, 7. - Albert HEIM en 1932, décrit dans son livre "Fergstarz und Menschenleben" un certain nombre de glissements qu'il a observés dans les Alpes. Pour les classer, il s'appuie principalement sur le type de matériaux ; la forme du mouvement et la teneur en eau devenant des critères secondaires.

a) les mouvements dans les débris (Schuttbewegungen).

- glissements de sols (Schutttrutschungen).
- glissements de terre de grande amplitude (Schuttstürze).

b) les mouvements dans les roches solides (Felsbewegungen).

- glissement de roches (Felsschlüpfe).
- écoulement (Felssturze).

c) les glissements composés, mixtes. (Gemischte und zusammengesetzt).

d) les mouvements divers.

(1) - Karl TERZAGHI, "Erdbaumechanik auf boden-physikalischer Grundlage" 1925.

TABLEAU N° 1 - CLASSIFICATION DE J. STINI

LA PESANTEUR AGIT			TYPE DE MOUVEMENT
I - DIRECTEMENT SUR	ROCHES	Matériau dur pesant fortement	ECROULEMENT DE ROCHES (Felsstürze)
	EBOULIS (déblais)		GLISSEMENT DE DEBRIS AVALANCHE DE TERRE (Erdlawinen)
			REPTATION
II - INDIRECTEMENT SUR	EBOULIS accompagnés de :	CORPS FLUIDES (EAU)	COULEE DU TYPE MUDFLOW (Muren)
		L'eau prédomine	EPANDAGE TORRENTIEL
		CORPS DURS (neige et glace)	AVALANCHE d'EBOULIS EBOULIS TRES MOBILES MOUVEMENT DE MORAINES

TABLEAU N° 2 - CLASSIFICATION DE K. TERZAGHI.

ORDRE	GROUPE	CLASSE	VARIETE
A. - Mouvements à sec	I - Reptation (mouvement de masse, continu)	1. Reptation de sol 2. Reptation d'éboulis (matériaux meubles) gravier glacier rocheux	
	II - Glissements (mouvement de masse rapide)	3. Mouvements de roches 4. Mouvements d'éboulis (matériaux meubles) 5. Glissements mixtes.	Ecroulement de roches Glissement dans gravier
B. - Mouvements plastiques	III - Affaissement et coulées (résultat d'une variation rapide de la porosité)	6. Sables bouillants et coulées de terre. 7. Chutes, coulées de sable. 8. Sédiments lacustres.	Cendres volcaniques Dépôts lacustres anciens Dépôts lacustres récents Dépôts lacustres mixtes
	IV - Dislocation et coulées (résultat d'une dislocation après gonflement et fragmentation)	9. Desquamation et altération. 10. Glissement profond dans matériaux homogènes. 11. Glissement profond dans matériaux hétérogènes. 12. Reprise de mouvement dans un ancien glissement.	
	V - Coulées résultant d'une suppression hydrostatique.	13. Glissement suivant des plans et joints de stratification. 14. Compression et expulsion résultant de sous-pressions locales.	
	VI - Expulsion (diminution de la résistance sous l'action d'une forte sous-pression)	15. Gonflement résultant d'une baisse de la pression. 16. Expulsion résultant de sous-pressions locales.	

A, 8. - Le Japonais MYABE (1935), distingue quatre types principaux (1) :

- a) les glissements de couches superficielles.
- b) les coulées de terre et de fragments de roches.
- c) les mouvements relativement lents de grandes masses de terre.
- d) les écroulements de grandes masses ou de fragments de roches.

A, 9. - G.E. LADD (1935), dans "landslides, subsidence and rockfalls" étudie les mouvements de terrain sous l'angle de l'ingénieur routier. Il existe pour lui, cinq classes principales.

- a) les coulées.
- b) les réajustements de versants.
- c) les effondrements par affouillement de couches.
- d) les glissements suivant un plan ou une ligne structurale.
- e) les écoulements d'argile provenant d'anciennes poches (rare)..

- B - CLASSIFICATION DE C.F. STEWARD SHARPE.

SHARPE en 1938, dans son livre "Landslides and related phenomena" propose une classification détaillée et précise des mouvements de terrain. Elle est encore à l'heure actuelle la base de nombreuses études théoriques et pratiques, aussi bien aux U.S.A. que dans les autres parties du monde. Cette classification repose sur les critères suivants :

- le type de matériaux ;
- le type ou la forme de mouvement ;
- les dimensions du mouvement ;
- les causes de mouvement ;
- la vitesse de mouvement ;
- l'organisation du matériau à l'intérieur de la masse glissée ;
- les relations entre masse en mouvement et substratum.

Il retient essentiellement trois facteurs principaux :

a) - le mode de mouvement qui permet de différencier deux processus : la coulée (flowage) et le glissement proprement dit (landslide). Cette différence réside pour lui dans la présence ou non d'une surface de glissement et dans la continuité de la déformation.

"La coulée quelle qu'elle soit se produit en l'absence de plan de glissement défini, et la déformation peut être considérée comme continue."

Le glissement proprement dit suppose par contre l'existence d'une surface de faiblesse définie, de forme variable la déformation n'est pas continue.

b) - la teneur en eau est le deuxième critère. Entre deux phénomènes extrêmes représentant le transport par la glace et par l'eau, on peut placer :

- les mouvements comprenant terre ou roche plus glace ;
- les mouvements comprenant terre ou roche seule ;
- les mouvements comprenant terre ou roche plus eau.

c) - le troisième critère sera le type de matériau.

Il distingue trois groupes principaux.

(1) - MYABE, Naomi. "Study of landslides". Bulletin of the Earthquake Research Institute. Vol. 13, Pt. I, p. 85 - 113, 165, 1935.

- I - Les coulées lentes (slow flowage). On groupe sous ce terme, les mouvements de solifluxion et de reptation lente répondant à la définition théorique de SHARPE. On parlera ainsi de :

- reptation de sol - "soil creep" ;
- reptation d'éboulis - "talus-creep" ;
- reptation de roches - "rock-creep" ;
- reptation de glacier rocheux - "rock-glacier creep" ;
- solifluxion.

- II - Les coulées rapides (rapid flowage) font intervenir une teneur en eau plus grande favorisant la "lubrification" du matériau. Le terme extrême de cette classe est représenté par le "transport" fluvial des matériaux.

- les coulées de terre s.l. - "earthflow" ;
- les coulées de boue - "mudflow" ;
- les avalanches de débris - "debris-avalanche".

- III - Les glissements proprement dits (landslides, landslips) sont définis comme étant "des mouvements perceptibles de glissement ou d'écroulement d'une masse plus ou moins humide, de terre, de roches ou les deux à la fois".

- glissement dit "rotationnel" - "slump" ;
- glissement de débris - "debris-slide" ;
- glissement de roches - "rockslide" ;
- écroulement de débris - "debris-fall" ;
- écroulement de roches - "rockfall".

Pour illustrer cette classification, SHARPE propose un tableau dans lequel il fait entrer en ligne de compte les principaux critères définis ci-dessus (voir tableau n° 3).

- C - CLASSIFICATIONS RECENTES.

Nous citerons essentiellement les travaux de WARD, BENDEL, VARNES et ceux des géologues russes.

C, 1. - WARD (1945) fonde sa classification sur :

- le mode de mouvement ;
- la nature du matériau ;
- l'épaisseur de la tranche en mouvement ;
- le teneur en eau relative ;
- les facteurs climatiques.

Nous décrivons cette classification dans le tableau n° 4.

C, 2. - L. BENDEL en 1948 s'attache surtout à énumérer les différents mouvements de terrain en fonction de leur localisation, il en tire ensuite les propriétés géologiques physiques et mécaniques de la masse en mouvement. Il parle ainsi de :

- a) glissement côtier.
- b) glissement sous-marin, sous-lacustre.
- c) éboulement de carrière.
- d) affaissement de route.
- e) éboulement de montagne.
- f) rupture de talus routier.

TABLEAU N° 3 - CLASSIFICATION DE C.F.S. SHARPE

MOUVEMENT		TERRE ou ROCHE					
TYPE	VITESSE	GLACE		EAU			
		Glace dominant	Terre ou roche + glace	Terre ou roche, sec ou peu d'eau	Terre ou roche + eau	Eau dominant	
COULEE	habituellement imperceptible	TRANSPORT GLACIAIRE	REPTATION DE ROCHES				TRANSPORT FLUVIATILE
			Reptation de Rock-glacier	REPTATION D'EBOULIS			
	Lent à rapide perceptible		SOLIFLUXION	REPTATION DE SOLS		SOLIFLUXION	
			AVALANCHE DE DEBRIS			COULEE DE TERRE COULEE DE BOUE (mudflow) AVALANCHE DE DEBRIS	
rapide	lent à rapide perceptible				Glissement "rotationnel"		
					Glissement de débris		
				Ecroulement de débris			
GLISSEMENT	très rapide	GLISSEMENT DE ROCHES					
		ECROULEMENT					
glissement ou coulée	brusque ou lent	AFFAISSEMENT - EFFONDREMENT					

TABLEAU N° 4. - CLASSIFICATION DE WARD

TYPE DE RUPTURE	MOUVEMENTS	ACTIONS CLIMATIQUES
<u>EROSION DE SURFACE</u> <u>REPTATION</u>	<ul style="list-style-type: none"> - Solifluxion (gel et dégel) - Erosion de sol avec transport rapide en surface des matériaux, par vent et pluie. - Reptation de sol. 	<ul style="list-style-type: none"> - température - pluie. - pluie et vent - tout agent climatique.
<u>GLISSEMENT DE FRAGMENTS DE ROCHES</u>	<ul style="list-style-type: none"> - <u>Sec</u> : mouvement par "roulement" du sable et gravier. - <u>Partiellement saturé</u> : glissement superficiel dans matériaux fins à faible cohésion. Les schistes perdent leur cohésion et donnent des glissements de débris. - <u>Saturé</u> : mouvements dans sables fins. - <u>Infiltrations</u> : écroulement des couches sus-jacentes minées par lessivage de sables. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vent - vibrations - secousse sismique. - Pluie - vent. - Pluies - vibrations. - Pluies - marées.
<u>ECROULEMENT et GLISSEMENT</u>	<ul style="list-style-type: none"> - Chutes résultant de l'action du gel et glissement profond selon joints ou failles. 	<ul style="list-style-type: none"> - température - pluie.
<u>GLISSEMENT de DEBRIS</u>	<ul style="list-style-type: none"> - Glissement superficiel de matériaux à cohésion faible. 	<ul style="list-style-type: none"> - pluie.
<u>GLISSEMENT ROTATIONNEL</u>	<ul style="list-style-type: none"> - Glissement rotationnel profond, typique dans les argiles. 	<ul style="list-style-type: none"> - pluie.

C, 3. - Des géologues russes tels que N.I. SOKOLOV ou G.S. ZOLOTAREV proposent des classifications détaillées fondées sur les critères suivants :

- lithologie ;
- âge ;
- hauteur du versant ou du talus ;
- humidité du terrain ;
- évolution du versant.

On peut ainsi distinguer plusieurs sortes de mouvements affectant des versants formés de roches dures.

- a) Les tassements de versant (Settling).
 - suivant des cassures tectoniques ou des plans de stratification.
 - suivant des fractures récentes.
- b) Les "fléchissements de versant" (Sagging) (1).
 - suivant des fractures tectoniques.
 - suivant des fractures récentes.

Dans cette rubrique, il est possible de faire d'autres subdivisions en fonction du processus d'enlèvement du matériau.

- + compression et éjection de roches broyées sous le poids de la masse des terres sous-jacentes.
- + compression et éjection de roches "plastiques".
- + coulée de roches rendues semi-fluides.
- + déformation thixotropique.
- + affouillement souterrain dû à l'eau.
- + cavités karstiques.
- + érosion, abrasion.

c) Les glissements de couches très pentues suivant des plans de stratification, dus à une entaille naturelle ou artificielle du versant.

- glissement lent sans broyage des masses adjacentes et des couches sous-jacentes.
- glissement rapide, avec déchirement, froissage des couches sous-jacentes et enlèvement de matériaux par tranches successives.

Cette subdivision correspond en fait au glissement de roches (rockslide) de SHARPE.

d) Les glissements de blocs (Block-slides), les blocs étant séparés du reste de la masse rocheuse par un tassement ou mouvement le long de plan de stratification ou de zones de fractures.

- mouvement très lent avec fractures de tassement masquées.
- mouvement lent représentant des fractures de tassement clairement marquées dans le relief.
- mouvement représentant des fossés de tassement visibles.
- mouvement très rapide passant à un écroulement de roches.

e) Les glissements de blocs et de masses entières de roches, le long d'anciennes surfaces de faibles pentes biseautant les couches.

- mouvement de petite amplitude avec non déformation des couches en tête du glissement.
- mouvement de grande amplitude avec déformation des couches en tête du glissement.

f) Mouvements suivant une surface de forme approchant la cycloïde.

- mouvement avec renouvellement partiel ou complet de la surface de rupture.
- glissement en masse suivant un réseau dense de fractures, présentant une aire de déplacement.

(1) - Le terme "sagging" peut se traduire littéralement par tassement - fléchissement de couches, de versant. Son équivalent russe a été employé pour la première fois par D.L. IVANOV (1899) pour désigner les mouvements affectant des masses rocheuses reposant sur des terrains tendres susceptibles de "foirer".

inscrite à l'intérieur d'une cycloïde.

g) Mouvements affectant des versants constitués de blocs ou de fragments de roches.

- écoulement de roches.
- coulées de fragments de blocs.
- accumulation de blocs (rock-stream).

C, 4. - I.V. POPOV en 1946, adoptant les idées de F.P. SAVARENSKY propose une des premières classifications établies sur la notion d'âge et d'évolution des versants. Si ces critères sont peu usités par les géologues occidentaux, ils le sont beaucoup plus chez les ingénieurs et géologues travaillant dans les "stations russes d'étude de glissement". Nous pouvons résumer sommairement les idées de I.V. POPOV dans un tableau (voir tableau n° 5)

C, 5. - David J. VARNES, travaillant au sein du Comité d'étude des glissements de la Commission routière des Etats-Unis (H.R.B.), a eu le souci d'élaborer une classification utilisable et d'ailleurs toujours très utilisée par les ingénieurs américains. Il retient deux critères de base :

- a) le type de matériaux impliqués dans le glissement.
 - sols, terrains meubles.
 - roches.
- b) le mode de mouvement.
 - écroulement.
 - glissement proprement dit.
 - coulée.

Il passe volontairement sous silence les mouvements de reptation et de solifluxion. Le détail de la classification se trouve résumé dans le tableau n° 6.

C, 6. - Les géomorphologues s'intéressent aussi beaucoup à l'évolution des versants. Pour eux, les glissements de terrain en représentent l'évolution catastrophique et visible. Ils retiennent essentiellement quatre facteurs de classification :

- a) l'inclinaison du versant.
- b) le type de roche ou de sol.
- c) le climat.
- d) la végétation.

RAPP en Norvège, par exemple, a étudié les versants de quelques vallées et les a classés suivant la pente :

- pente forte (30° à 90°)
- pente modérée (30°)
- pente faible (subhorizontale à 30°)

et suivant les zones de végétation :

- zone forestière.
- zone de toundra et de rocailles.

- D - CONCLUSION

Ce bref rappel historique nous permet de grouper les différentes classifications dans quatre rubriques principales.

- a) Les classifications à caractère mécanique et dynamique (nous entendons par dynamique le facteur vitesse de déplacement).
- b) Les classifications descriptives faisant intervenir le type de matériau.

TABLEAU N° 5. - CLASSIFICATION DE I.V. POPOV

AGE	ETAT du VERSANT	CARACTERISTIQUES	
		d'AGE	d'ETAT
<u>RECENT</u>	en mouvement	Niveau de base de l'érosion récent.	Processus tendant à l'établissement d'un équilibre.
	en suspens		Cause d'instabilité temporairement compensé par un facteur de sécurité.
	Arrêté ou retenu.		Cause temporairement éliminée.
	Achévé.		Effet discontinu de la cause d'instabilité.
<u>ANCIEN</u>	Exposé.		Sol de couverture ou elluvions en surface.
	Enterré.		Glissements recouverts par des dépôts postérieurs au mouvement.

- 12 -

in POPOV, I.V. "A Scheme for the natural classification of Landslides"
Doklady Acad. Sci. U.S.S.R. Vol. 54 (1946).

TABLEAU N° 6. - CLASSIFICATION DE J. VARNES

MODE DE MOUVEMENT	TYPE DE MATERIAU			
	ROCHES		SOLS - TERRAINS MEUBLES	
<u>ECROULEMENT</u>	Ecoulement de roches		Ecoulement de sols	
masse peu fragmentée	Rotationnel "Slump"	Plan Glissement de blocs.	Plan Glissement de blocs.	Rotationnel Glissement de blocs.
<u>GLISSEMENTS</u>				
masse très fragmentée	Glissement de roches.		Glissement de débris.	Rupture par expansion latérale.
	MATERIAUX MEUBLES			
	Fragments de roches	Sable ou silt	Mélange	Matériaux très plastiques.
Sec				
<u>COULEES</u>	Coulées de fragments de roches.	Coulées de sable, de loess.		
		Coulée boueuse rapide.	Avalanche de débris.	Coulée boueuse lente.
Humide		Coulée de sable ou de silt.	Coulée de débris	Coulée de vase (mudflow).

- 13 -

in H.R.B. Special Report 29 P. 21, 1958.

c) Les classifications descriptives faisant intervenir la structure des versants.

d) Les classifications purement morphologiques.

Un cinquième groupe pourrait être introduit, celui des classifications fondées sur l'âge des glissements. Le tableau n° 7 donne un aperçu de la répartition de ces différentes rubriques.

II°. - PRINCIPAUX CRITERES DE CLASSIFICATION

Le paragraphe précédent rend parfaitement compte de la diversité des classifications des mouvements terrain. Cette diversité semble avoir plusieurs causes.

Il faut tenir compte en premier lieu des différentes disciplines pratiquées par les auteurs, géologie - mécanique des sols - géomorphologie, qui les amènent à étudier tel ou tel phénomène en fonction d'une spécificité très précise. Nous avons ainsi des classifications uniquement descriptives ou mécaniques.

La trop grande régionalisation des études oblige souvent l'auteur à s'en tenir aux mouvements qu'il peut observer dans une certaine gamme de matériaux. Il laissera donc de côté des types importants de mouvements.

Une classification élaborée dans un but pratique très précis peut être parfois trop restrictive. Ainsi certaines classifications, créées, pour l'ingénieur routier par exemple, ne tiennent pas toujours compte de facteurs importants comme le type précis de mouvement, l'âge, l'histoire du matériau. Bon nombre de géologues et d'ingénieurs n'étudient d'ailleurs que les manifestations catastrophiques des mouvements ; le processus de reptation souvent passé sous silence car il n'engendre en général que des mouvements très lents et des déformations relativement limitées.

C'est pourquoi nous nous attacherons dans ce paragraphe, à dégager les caractéristiques propres aux mouvements (stables ou non) susceptibles de servir de base à la fois à une classification claire et accessible, dans certains cas, aux non spécialistes eux-mêmes et à un essai de systématisation d'étude des glissements de terrain.

Nous grouperons ces différentes caractéristiques sous cinq rubriques principales.

II, A - Les critères purement géologiques.

II, B - Les critères géomorphologiques et topographiques.

II, C - Les critères hydrogéologiques et climatiques.

II, D - Les critères mécaniques et dynamiques.

II, E - Les critères d'âge.

II, A - LES CRITERES PUREMENT GEOLOGIQUES.

Nous entendons par ce terme, l'ensemble des données stratigraphiques, lithologiques, pétrographiques, sédimentologiques et structurales que l'on peut déduire de l'étude d'un versant donné et de ses matériaux constitutifs. Ils nous permettront en effet de connaître d'une façon plus ou moins approchée, l'histoire du versant étudié et de fournir à l'ingénieur des paramètres nouveaux qu'il pourra faire entrer en ligne de compte dans ses calculs de stabilité.

Ces différentes données constituent ce que nous appellerons désormais au cours du présent travail, LA METRIE INTERNE DU VERSANT ET DES MATERIAUX.

Nous citerons successivement :

II, AI - Le type de matériau.

a) Roches massives, solides.

b) Roches meubles, sans cohésion (pas ou peu de fissures) avec cohésion (présence de fissures).

Classifications mécaniques et dynamiques	Classifications descriptives type de matériaux	Classifications descriptives structure du versant	Classifications descriptives morphologiques	Classifications fondées sur l'âge
A. PENCK (1894) D. MOLITOR (1894)	BALTZER (1875)		J. STINI (1910) R. ALMAGIA (1910)	
J. STINI (1910)	BRAUN (1908) E. HOWE (1909)		BERNARD (1927)	
W. PENCK (1924) K. TERZAGHI (1925)	K. TERZAGHI (1925) A. HEIM (1932) G.E. LADD (1935)	G.E. LADD (1935)	MYABE (1935)	
HENNES (1936) C.F.S. SHARPE (1938)	C.F.S. SHARPE (1938) L. MORET (1945)		L. MORET (1945) W.H. WARD (1945)	I.V. POPOV (1946)
W.H. WARD (1945)		N.I. SOKOLOV G.S. ZOLOTAREV Ecole Russe	L. BENDEL (1948)	
W. KJELMANN (1955) N.N. MASLOV (1957)	D.J. VARNES (1958) Ecole Japonaise		D.J. VARNES (1958) RAPP P. NICOTERA (1959)	

II, A2 - Nature lithologique et mode de dépôt.

a) Terrains de couverture.

- matériaux d'altération.
- matériaux déposés par l'eau : plaine alluviale, terrasse.
- dépôts lacustres.
- dépôts glaciaires : moraines anciennes, actuelles.
- dépôts éoliens : sables, loess.
- dépôts mixtes : fluvio-glaciaire, fluvio-lacustre, glacio-lacustre.
- matériaux ayant déjà glissés.
- dépôts artificiels : remblais et déblais routiers, crassiers, terrils, etc.

b) Matériaux du substratum.

- roches sédimentaires.
- roches éruptives, plutoniques et volcaniques.
- roches métamorphiques.

II, A3 - Géométrie des matériaux.

a) Formes.

- matériaux à grains arrondis.
- matériaux à grains anguleux.
- matériaux en plaquettes.

b) Assemblages.

- absence d'un ciment, assemblage lâche.
- présence d'un ciment quelconque, liaisons effectives intergranulaires, liaisons très solides - liaisons fragi

c) Allure et disposition du dépôt.

- matériaux en grandes masses plus ou moins homogènes.
- matériaux stratifiés, en gros bancs - en petits bancs, présence ou non d'interlits argileux ou marneux.
- matériaux disposés en lentilles.

Le mode de dépôt et la disposition des matériaux d'un versant revêtent une très grande importance quant à la détection de surfaces de faiblesse éventuelles, susceptibles de délimiter des zones instables.

II, A4 - Fracturation du versant.

a) Géométrie de la fracturation.

- accidents majeurs délimitant des volumes importants susceptibles de glisser : chevauchement - charriag failles.
- accidents mineurs : failles - diaclases - joints.
- microfissuration affectant le matériau.

Ceci nous amène tout naturellement à parler de la densité et de la nature de la fracturation.

b) Densité de la fracturation.

Nous introduirons ici la notion de maille que l'on peut définir à la suite de B. SCHNEIDER, comme l'espace moyen des fractures d'un type donné. Nous considérerons ainsi :

- les versants peu ou pas fissurés - homogènes - sains. Suivant la nomenclature de MULLER, on parlera de système "monolithique" (voir fig. 1).
- les versants moyennement fissurés - "système à blocs reliés" de MULLER (fig. 2).
- les versants très fissurés - "système à blocs fissurés" (fig. 3).
- les versants broyés - "système à corps multiples" ou à corps libre (fig. 4).

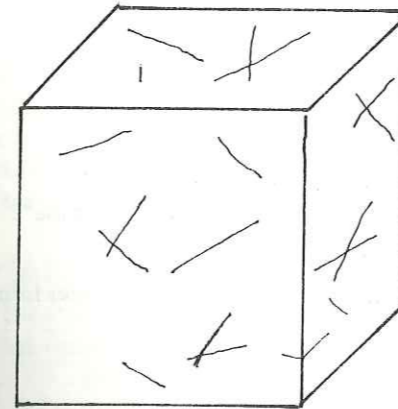


Fig.1

système monolithique

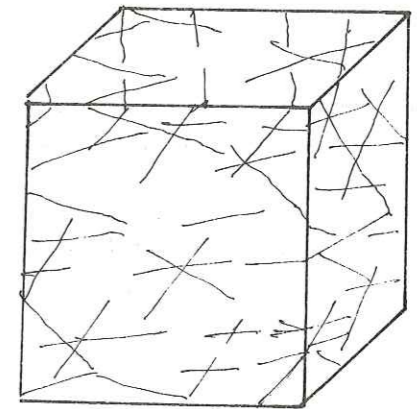


Fig.2

système à blocs reliés

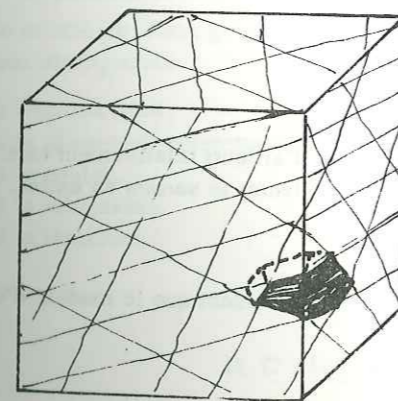


Fig.3

système à blocs fissurés

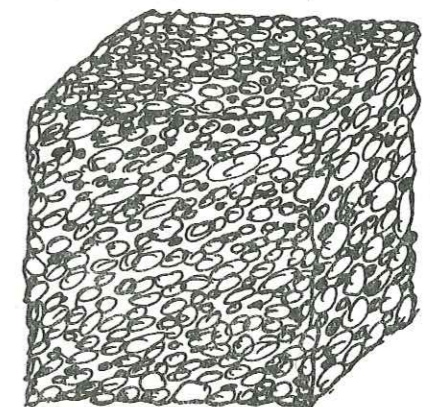


Fig.4

système à corps multiples

nomenclature de L. MULLER (1963)

c) Nature de la fracturation.

- ouverte, sans remplissage : sèche ou humide.
- ouverte, avec remplissage continu ou discontinu : sèche ou humide.
- fermée, remplissage continu, minéralisation.

II, A5 - Structure du versant.

Le facteur majeur et déterminant est la pente de la stratification.

- a) Couches verticales, présence ou non de fauchage.
- b) Couches subhorizontales, avec possibilité ou non de tassement des têtes de couches.
- c) Couches pentées conformément à la surface topographique, on parle alors de "versant conforme".
- d) Couches pentées inversement à la surface topographique, le versant est dit alors "inverse".

La conformation générale des pentes de couches est évidemment tributaire des plis de toutes sortes formés au cours de l'histoire géologique.

II, B - LES CRITERES GEOMORPHOLOGIQUES ET TOPOGRAPHIQUES.

Depuis un certain nombre d'années, les géomorphologues observent avec précision les formes de terrain et essayent de résoudre les problèmes posés par l'évolution des versants. Sans entrer immédiatement dans le détail des nombreuses formes particulières affectant une pente, nous essayerons de dégager les quelques facteurs topographiques et morphologiques importants, accessibles à l'observation courante, et susceptibles d'aider au classement et à la définition de tel ou tel mouvement de terrain. Nous introduisons dans ce paragraphe le terme de GEOMETRIE EXTÉRIEURE que nous emploierons fréquemment au cours de notre étude ; ce terme recouvre en fait toutes les données ayant trait aux formes, à la localisation, à la pente des versants.

II, B 1 - L'allure générale du versant.

A la suite des géomorphologues, nous pouvons différencier :

- a) les versants rectilignes sans trace de mouvement apparent ; ce type est d'ailleurs relativement rare.
- b) les versants à "façonnement généralisé" où les mouvements semblent affecter le versant en entier.
- c) les versants à "façonnement localisé".
- d) les versants "façonnés localement à leurs pieds".

Le terme de "façonnement" est employé ici pour plus de commodité, il est évident que le modelé d'un versant ne dépend pas seulement du déclenchement de glissements.

II, B 2 - La pente des versants.

Ce critère devient primordial pour l'ingénieur, au stade des calculs de stabilité de talus. Il peut d'ailleurs constituer parfois le facteur majeur d'une classification. Nous ferons les premières subdivisions suivantes :

- a) les étendues subhorizontales.
- b) les versants en pente douce allant de quelques degrés de pente à 20°.
- c) les versants moyennement inclinés, de 20° à 30°.
- d) les versants à forte pente, de 30° à 60°.
- e) les versants subverticaux, les parois verticales, les surplombs.

Dans le cadre d'étude statistique, certains auteurs préfèrent recourir au langage du projeteur. On peut alors distinguer six catégories principales :

- a) les versants plus inclinés que 1/1
- b) les pentes allant de 1/1 à 1/2
- c) les pentes allant de 1/2 à 1/3

- d) les pentes allant de 1/3 à 1/4
- e) les pentes allant de 1/4 à 1/5
- f) les versants plus plats que 1/5.

II, B 3 - Epaisseur de la masse en mouvement.

- a) Les glissements profonds affectant soit les terrains de couverture soit le substratum, soit les deux à la fois.
- b) Les glissements superficiels affectant des couches de terrain d'environ 5 m d'épaisseur ; les phénomènes de reptation et de solifluxion se rangent dans ce groupe.
- c) Les glissements plus larges que longs (1).
- d) Les glissements plus longs que larges (1).

II, B 4 - La localisation du versant ou du mouvement.

- a) Les versants côtiers, affectés principalement d'éroulement et de glissements de blocs.
- b) Les versants de vallées.
 - présence d'un cours d'eau au pied du versant, ce cours d'eau peut avoir un tracé rectiligne ou sinueux.
 - présence d'un cours d'eau subséquent.
- c) Les berges de lac ; il peut s'agir de :
 - lacs naturels.
 - lacs artificiels tels que les retenues de barrage, on doit tenir compte alors des fluctuations de niveau.
- d) Les mouvements de talus routiers, ferroviaires, de digues.
- e) Les mouvements provoqués et localisés, carrières, terrils "en marche".
- f) Les mouvements sous-marins.

II, B 5 - Le mode de mouvement.

Ce critère est d'une grande importance pour l'élaboration d'une classification simple ; en première approximation, nous distinguerons :

- a) l'éroulement.
- b) le glissement proprement dit.
- c) la coulée.
- d) la solifluxion.
- e) la reptation.

II, C - LES CRITERES HYDROGEOLOGIQUES ET CLIMATIQUES.

Tout le monde s'accorde à reconnaître le rôle primordial que joue l'eau, dans le déclenchement des mouvements. Suivant son état, son mode d'action, son influence sur la végétation, elle peut fournir un excellent critère de classement.

II, C 1 - Etat de l'eau.

- a) état solide : permanent ou temporaire.
- b) état liquide.
- c) état gazeux (dans quelques cas particuliers).

(1) - Largeur = distance entre les deux bords latéraux du glissement
Longueur = distance entre la tête et le pied du glissement.

II, C 2 - Origine de l'eau et intensité de son action.

a) Eau météorique : précipitations.

- pluies faibles.
- pluies modérées.
- pluies violentes, intermittentes.
- pluies violentes, prolongées.

b) Eau de ruissellement.

- eau de fonte des neiges imprégnant plus ou moins superficiellement le terrain. Il peut y avoir des relations éventuellement avec la présence du gel en profondeur.
- eau de ruissellement convenablement drainée et ne séjournant pas ou très peu de temps sur le versant.
- eau séjournant dans le versant et s'infiltrant.

Ces deux derniers facteurs sont directement influencés par la pente du versant et la perméabilité des terrains.

c) Eau souterraine.

- nappe à surface libre avec variation de niveau piézométrique, de plus ou moins grande amplitude.
- nappe en charge occasionnant des sous-pressions dans le versant.

II, C 3 - Mode d'action de l'eau.

- a) Erosion de pieds de talus.
- b) Erosion de surface, érosion régressive.
- c) Batillage.
- d) Marées.
- e) Sous-pressions.
- f) Erosion souterraine.
- g) Altération.
- h) Dissolution.
- i) Variation du niveau piézométrique.

II, C 4 - Zones climatiques.

- a) Climat tempéré, humide ou non.
- b) Climat désertique.
- c) Climat tropical humide, alternances saison sèche - saison humide.
- d) Climat froid et zone de haute montagne, gel permanent ou non.

II, C 5 - Zones de végétation.

- a) Zone de forêts.
- b) Zone de maquis, taillis.
- c) Zone de cultures.
- d) Zone de prairies.
- e) Zone sans végétation, rocailles.
- f) Zone de toundra.

II, D - LES CRITERES MECANIQUES ET DYNAMIQUES.

L'ingénieur, de par sa formation, attache une grande importance aux facteurs mécaniques et dynamiques du sol, ou de la roche. Bien que la "théorie de la stabilité des terres" soit dans de nombreux cas difficilement applicable, (le sol n'étant ni homogène, ni isotrope, ni continu par nature) il existe des paramètres utilisés couramment par le mécanicien des sols ou des roches, lui permettant de différencier au départ un certain nombre de phénomènes régissant l'évolution d'un talus. Ces paramètres sont déduits la plupart du temps, d'essais pratiqués en laboratoire sur des échantillons "non remaniés" et dont les propriétés sont sensées s'approcher le plus possible du matériau "in

Dans ce paragraphe, nous retiendrons essentiellement, la cohésion, l'angle de frottement interne, la sensibilité et l'activité du matériau, les propriétés de ou des surfaces de glissement, la vitesse de mouvement.

II, D 1 - La cohésion.

La cohésion d'un matériau est la valeur limite de la contrainte tangentielle, pour laquelle il n'y a pas de rupture. Elle est la somme de la cohésion vraie (dépendant des liaisons moléculaires entre les particules) et de la cohésion apparente (résultant de la tension superficielle de l'eau se trouvant dans les espaces intergranulaires).

On parle ainsi de :

- a) matériaux sans cohésion.
- b) matériaux avec cohésion.

II, D 2 - L'angle de frottement interne.

Un élément de massif en contact avec la surface d'un autre élément est en équilibre quand la contrainte interne correspondante, ne s'écarte pas d'un certain angle avec la normale à la surface ; cet angle désigné par φ s'appelle l'angle de frottement interne.

La rupture d'un massif survient quand la contrainte tangentielle atteint une certaine valeur critique, qui, entre autre chose, est fonction de l'angle de la surface libre du versant ou du talus avec l'horizontale "i".

- a) Angle i inférieur à φ , versant stable.
- b) Angle i supérieur à φ ,
 - équilibre stable sous certaines conditions.
 - équilibre instable pour un massif non cohérent.

II, D 3 - Activité et sensibilité du matériau.

Les Scandinaves et les Anglais utilisent d'une façon courante ces facteurs dans leurs classifications des mouvements affectant les fameuses argiles dites "sensibles".

a) L'activité.

Suivant SKEMPTON (1953), l'activité d'une argile ou d'un sol argileux est le rapport de l'indice de plasticité à la quantité d'argile, ou pourcentage pondéral des particules inférieures à 2 microns (1).

Il propose 5 groupes :

- groupe 1 : inactif ayant une activité inférieure à 0,5.
- groupe 2 : inactif ayant une activité comprise entre 0,5 et 0,75.
- groupe 3 : normal ayant une activité comprise entre 0,75 et 1,25.
- groupe 4 : actif ayant une activité comprise entre 1,25 et 2,00.
- groupe 5 : très actif ayant une activité supérieure à 2,00.

b) La sensibilité.

K. TERZAGHI (1944), a défini la "sensibilité" comme le rapport de la résistance d'un sol non remanié à sa résistance après remaniement, à teneur en eau égale.

ROSENQUIST (1953), divise les sols argileux en 8 groupes, suivant leur sensibilité (St).

- Argile non sensible : St de 0 à 1.
- Argile faiblement sensible : St de 1 à 2.
- Argile moyennement sensible : St de 2 à 4.
- Argile très sensible : St de 4 à 8.
- Argile peu rapide : St de 8 à 16.

(1) - SKEMPTON s'est aperçu que dans une couche d'argile le rapport de l'indice de plasticité (Ip) à la proportion d'argile (A %) était presque constant et qu'il pouvait être défini comme "l'activité" de la couche.

- Argile moyennement rapide : St de 16 à 32.
- Argile très rapide : St de 32 à 64.
- Argile extrêmement rapide : St supérieur à 64.

Ces deux notions font intervenir de nombreux facteurs tels que les limites et indices de plasticité et de liquidité, la teneur en eau, la taille des particules, le pourcentage d'argile, la nature de l'argile, le pourcentage de sels dissous, le pourcentage de matières organiques,

II, D 4 - Surface de faiblesse ou surface de glissement.

L'étude des formes, de la nature de ou des surfaces de glissement peut être un excellent critère de classement.

a) Existence ou non d'une ou plusieurs surfaces.

- surface de glissement visible :
 - + une surface bien définie,
 - + plusieurs surfaces, ou plusieurs éléments de surfaces.
- surface (s) non visible (s).
- absence de surface de glissement.

b) Forme de la surface.

- surface courbe gauche "en cuillère".
- surface plane.

c) Position par rapport à la surface topographique.

- surface de glissement, superficielle.
- surface de glissement, profonde.

d) Type de surface de glissement.

- surface définie dans un matériau homogène (assez rare).
- limite substratum - terrains de couverture.
- fracture quelconque.
- plan de stratification.
- plan de schistosité.
- plan de foliation.

II, D 5 - Vitesse de mouvement.

Ce critère dynamique constitue parfois à lui seul la majeure partie d'une classification (BRAUN). A la suite d'études statistiques, les Américains proposent six gammes de vitesses de déplacement.

- a) Les mouvements extrêmement rapides : 30 cm par seconde.
- b) Les mouvements très rapides : 30 cm par minute.
- c) Les mouvements rapides : de 30 cm/minute à 1,50 m/jour.
- d) Les mouvements modérés : de 1,50 m/jour à 1,50 m/mois.
- e) Les mouvements lents : de 1,50 m/mois à 30 cm/an.
- f) Les mouvements extrêmement lents : 6 cm/an.

O. LANSER a essayé de classer quelques types de mouvement en fonction des vitesses de déplacement, le tableau n° 8 en donne un aperçu ; toutefois, il n'existe encore que trop peu d'observations précises et fidèles pour pouvoir bâtir une classification simple et utilisable.

TABLEAU N° 8 - CLASSIFICATION DES VITESSES DE MOUVEMENT.

TYPE DE MOUVEMENT	Ordre de grandeur de la VITESSE	Ordre de grandeur de la MASSE en mouvement
ECROULEMENTS (Bergstürze) (Felsstürze)	Front du mouvement : jusqu'à 100 m/sec.	- Jusqu'à plusieurs millions de m ³ . - En une seule fois (chute isolée) : plus de 100 millions de m ³ et davantage.
EBOULEMENTS (Hangrutsche) AVALANCHE de TERRE (Erdlawinen)	Environ 10 m/sec. mais quelquefois davantage.	Tous les ordres de grandeur, de quelques m ³ à 10 ⁵ m ³ .
GLISSEMENTS DE ROCHES	Plusieurs m/sec.	Jusqu'à plusieurs millions de m ³ .
EPANDAGE TORRENTIEL CHARRIAGE de GALETS dans l'eau	Galets isolés jusqu'à quelques m/s Sables et galets jusqu'à quelques 100 m/an.	Illimité, continu, permanent.
MOUVEMENTS DE MORAINES superficiels.	Dans les conditions "Alpines" 10 à 20 m/an.	Illimité, continu, permanent.
REPTATION (Gekriech)	De 10 ⁻² jusqu'à 10 ⁻¹ m/an jusqu'à 3 cm/j. (d'après THERZAGHI)	Depuis la motte de terre jusqu'à plusieurs 10 ⁵ m ³ .

II, E - LES CRITERES D'AGE.

L'âge d'un glissement est souvent considéré, à tort, comme un critère secondaire. Nous considérons cependant que toute étude effectuée dans un but pratique et économique doit faire état des distinctions d'âge et que ce critère peut dès lors être utilisé avec bénéfice pour classer les mouvements observés. Devant les difficultés de traduction de certains ouvrages, notamment pour les travaux russes et le manque d'interprétation précise explicitée par des exemples concrets (classification de I.V. POPOV par exemple), nous parlerons essentiellement à notre stade,

- a) de glissements anciens d'âge géologique parmi lesquels on peut ranger les grands glissements post-glaciaires
- b) de glissements anciens historiques ayant lieu au cours de notre ère.
- c) de glissements récents en activité ou non pouvant être d'ailleurs la remise en mouvement des deux catégories ci-dessus.

II, F - CONCLUSIONS.

Ces différents et nombreux critères ainsi énumérés ne peuvent évidemment contribuer, tous à la fois, à l'élaboration d'une classification générale et idéale des mouvements de terrain. Toutefois, ils laissent toute latitude quant à la manière possible et la plus simple de classer les glissements dans un cadre régional précis, en fonction de problèmes particuliers, constructions de canaux, de voies de communication, de retenue de barrage, étude de la présence et de la continuité de couches argileuses etc...

III° - ESSAI DE CLASSIFICATION SYNTHETIQUE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN.

Nous n'avons pas l'intention, au cours de ce paragraphe d'élaborer une nouvelle classification des mouvements de terrain. Seule, une étude statistique portant sur un grand nombre d'exemples, pourrait nous permettre de faire une telle synthèse ; une étude de ce genre nécessiterait d'ailleurs la mise en œuvre d'une équipe de chercheurs (de diverses disciplines) travaillant à long terme sur des observations précises de terrain, sur des exemples traités dans la littérature et sur des enquêtes effectuées auprès des services techniques intéressés par l'évolution des versants.

Nous nous bornerons donc à clarifier certaines données antérieures, et à proposer un canevas souple servant de support à un essai de classement.

Nous retiendrons d'abord quatre critères principaux relativement faciles à utiliser dès les premières observations de terrain :

- le mode de mouvement.
- le type de matériaux.
- les dimensions de mouvement.
- les vitesses de mouvement.

A partir de ces quatre idées directrices, nous ferons d'autres subdivisions suivant le degré d'humidité du matériau, la position et la forme d'une éventuelle surface de glissement, le façonnement du versant... critères nécessitant des observations et des études plus approfondies.

Nous aboutirons ainsi au premier schéma suivant :

- III°, A - Les écoulements et éboulements.
- III°, B - Les glissements proprement dits.
- III°, C - Les coulées.
- III°, D - La solifluxion.
- III°, E - La reptation (creep).

Cette première subdivision peut paraître artificielle ; en effet, il n'est pas rare d'observer dans la nature, des glissements ou des écoulements se transformant en coulées. Certains auteurs ont tourné élégamment la difficulté en introduisant dans leur classification, la notion de glissement composé ou complexe. Plutôt que de créer un sixième groupe de mouvements servant de "fourre-tout", nous pensons qu'il est préférable d'examiner et de classer le mouvement initial du versant en premier lieu, et d'étudier ensuite les mouvements secondaires affectant les matériaux instables.

III°, A - LES ECOULEMENTS ET EBOULEMENTS.

III°, A 1 - Définition.

Une mise au point semble s'imposer au départ quant à l'utilisation du terme écoulement ou éboulement. Il est fréquent en effet, de trouver ce mot employé dans la littérature pour relater un mouvement catastrophique, ce qui dans bien des cas peut porter à confusion car il sert alors à décrire des modes de mouvements très différents.

L'écroulement représente en fait un phénomène particulier que nous allons décrire.

De nombreux auteurs définissent ce mouvement comme "la chute (1) relativement libre d'une plus ou moins grande masse de matériaux détachée d'une falaise" (C.F.S. SHARPE, 1938 - D.J. VARNES, 1958).

Nous définirons l'écroulement comme le processus engendré par une ou plusieurs masses se détachant brusquement de la paroi rocheuse ou terreuse à laquelle elles appartenaient, pour venir former au pied du versant, après une chute plus ou moins longue, des nappes de matériaux grossiers.

On a souvent essayé de faire une distinction entre les termes écoulement et éboulement, à partir de diverses considérations.

Nous conviendrons de parler d'écroulement dans le cas de départ, en une seule fois, de masses importantes de roches.

Le terme d'éboulement sera réservé au processus engendrant le départ progressif d'éléments plus ou moins gros. Cette distinction est d'ailleurs d'un intérêt spéculatif mineur, et nous nous intéresserons essentiellement au premier processus cité.

III°, A 2 - Classification des écoulements.

Selon que l'on a affaire à des roches ou à des sols on parlera respectivement, d'écroulement de roches (Rockfall - Felsstürze - Frane per Crollo) d'écroulement de sols (Soilfall).

L'écroulement de sols est peu courant ; certes les parois composées d'alluvions, par exemple, se ruinent par départ de matériaux, mais la chute brusque de grandes masses est relativement rare car elle suppose une forte cohésion du sol et une fracturation définie et continue. T.H. CLARK (1947) a décrit rapidement un écoulement de sols sur les bords de la Grande Rivière du Chêne au Québec, affectant des blocs de sables indurés et d'argile à aspect bréchoïde ; la masse écroulée a d'ailleurs détourné le cours de la rivière.

Nous distinguerons essentiellement trois types d'écroulement de roches :

a) L'écroulement de falaise, affouillée à sa base par les eaux de ruissellement, de sources ou par l'érosion linéaire d'un cours d'eau (fig. 5). Ce type classique se trouve abondamment illustré dans la nature du fait de l'existence fréquente dans les séries géologiques du couple masse calcaire sur roches tendres.

b) L'écroulement par "foirage" de couches sous-jacentes tendres supportant une masse dure, pesante et très fracturée (fig. 6).

c) L'écroulement de roches dures, homogènes, fracturées, soumises à l'action dissociante du gel et de la pression hydrostatique (fig. 7).

(1) - Les Anglo-Saxons emploient d'ailleurs le terme général de "fall".

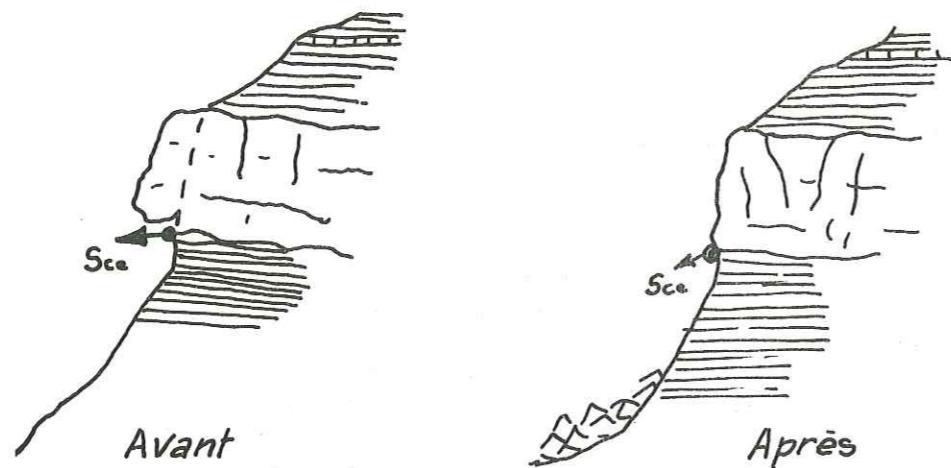


Fig. 5. Écroulement par affouillement.

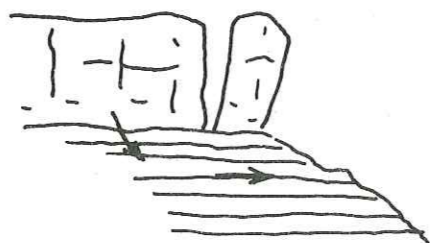


Fig. 6. Écroulement par "foirage" de couches tendres.

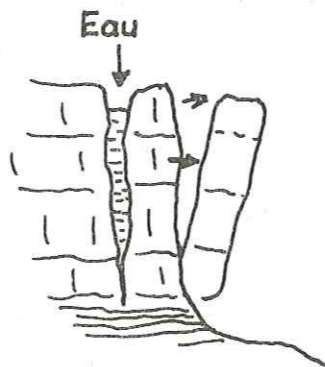


Fig. 7. Action de la pression hydrostatique ou du gel.

Nous citerons l'exemple de l'écroulement historique du Mont Granier au Sud de Chambéry (Savoie). La catastrophe qui fit de nombreuses victimes se produisit au Moyen Age dans la nuit du 24 au 25 novembre 1248. Un pan de calcaire miné à sa base au contact avec un soubassement marno-calcaire par des sources subitement grossies par de violentes pluies, s'écroula. La nappe de matériaux éboulés recouvre une superficie moyenne de 1500 hectares et ensevelit la petite ville de Saint-André et plusieurs hameaux, on estime à 150 000 000 mc le volume de la masse de blocs écroulés dont quelques uns sont de très grande taille, (l'un d'eux dépasse les 500 mc, ses dimensions sont de l'ordre de 24 m en longueur, 8 m en largeur, 14 m de hauteur).

Le résultat de ce nouvel état du versant se traduit dans la morphologie, par un aspect chaotique de la région connue sous le nom "d'Abymes de Myans"⁽¹⁾.

Les blocs sont tombés sur une ancienne moraine très argileuse, ce qui pourrait expliquer la très grande superficie recouverte, en admettant l'hypothèse très vraisemblable d'une mise en mouvement de l'argile sous l'effet de "battage" provoqué par l'écroulement.

III°, A 3 - Caractéristiques propres aux écroulements.

a) Le mouvement affecte une masse dure et homogène à l'échelle de la falaise ou de la cuesta ; l'écroulement ne peut en effet englober, à la fois, la masse solide et son support tendre quand il existe.

b) L'écroulement, régi essentiellement par les facteurs "d'appel au vide" et de pesanteur, suppose des conditions strictes de pente et de fracturation.

- La pente sera forte allant de 70° au surplomb.
- Les fractures, diaclases, failles, doivent être suffisamment denses et continues pour autoriser des départs en grandes masses.

c) Le mécanisme général peut se décomposer en trois étapes principales :

- écartement ou dilatation des fissures ⁽²⁾,
- basculement ⁽³⁾,
- chute proprement dite.

d) La durée des différentes étapes est très variable et reste difficile à apprécier. La dilatation des fissures et le "foirage" ou "creep profond" des couches sous-jacentes est vraisemblablement un phénomène très lent, en évolution constante ; ce processus s'accélère considérablement sous l'action d'agents tels que les secousses sismiques, les crues de rivières, une période de gel prolongée, les périodes de pluviosité anormale. Le basculement bien que progressif se fait à une vitesse relativement rapide. Quant à la chute, elle est extrêmement rapide et brusque.

Le mécanisme final de l'écroulement d'après la nomenclature américaine atteint des vitesses de l'ordre de 30 cm/s au minimum.

e) Ce type de mouvement supposant par définition un volume assez important de matériaux, développe une énergie considérable difficilement chiffrable, qui peut aider à faire la lumière sur certains problèmes.

- Ainsi, la force vive de l'écroulement, alliée à une hauteur de chute qui peut être importante est susceptible de rendre les matériaux éboulés aptes à traverser en fin de parcours des surfaces pratiquement horizontales, ce qui amène certains auteurs à formuler le théorème suivant :

in J.L. (1966) "Une grande falaise, lointaine et haut perchée est plus dangereuse qu'une paroi proche peu élevée, mais le rythme de sa menace étant beaucoup moins fréquent (séculaire voire millénaire), on a tendance parfois à oublier sa présence".

- On parle aussi "d'énergie de battage" c'est-à-dire la force permettant à un terrain donné, encaissant le choc de l'écroulement, de se mettre en mouvement sous forme de coulée, par exemple. Ce phénomène est semble-t-il beaucoup plus fréquent qu'on ne le pense et peut ainsi expliquer d'une façon

(1) - Dans les anciens parlers savoyards, le mot "abîme signifie souvent éboulement ou écroulement.

(2) - La dilatation des fissures peut être la conséquence du "foirage" des couches sous-jacentes, de l'action du gel, de la pression de l'eau.

(3) - Dans le cas de falaises surplombantes, cette phase n'existe pas.

élégante les distances considérables parcourues par les matériaux écroulés.

K. TERZAGHI a décrit un phénomène de ce genre dans les Alpes calcaires autrichiennes, à Pulverhörndl. Une tour calcaire, isolée reposant sur un socle de marnes, s'écroule vers la fin de l'année 1920. Sous le choc, les marnes se transforment en une coulée de boue de 7 600 000 m³ alors que la tour elle-même avait un volume de 200 000 m³.

f) On mentionnera enfin, la morphologie très typique des masses écroulées, reconnaissables à la grande taille des blocs (cf. région des Abymes de Myans déjà citée). La zone vocontienne montre de fréquents "paquets écroulés puis glissés" de taille importante ; par exemple les pans de falaise tithonique partis en "luge" sur un talus de terre noire.

III°, A 4 - Remarques.

Constatant que lors d'un écroulement, le matériau subit une transformation irréversible en passant de l'état de masse (déjà plus ou moins divisée potentiellement) à l'état d'éboulis très divisé, nous formulerons quelques remarques.

a) Nous nous rendons compte que l'écroulement proprement dit ne représente pas toujours le point final de l'instabilité d'une pente donnée. Il peut être au contraire le moteur d'autres phénomènes tous aussi catastrophiques. Nous avons parlé de la coulée provoquée par la chute de masses importantes de rochers ; il existe aussi un autre mouvement que les Anglo-Saxons appellent avalanche d'écroulement (Rockfall-Avalanche), représentant l'aboutissement d'un énorme écroulement. L'unanimité est loin d'être faite d'ailleurs sur son mécanisme, nous en reparlerons dans un prochain chapitre.

b) On doit se rappeler aussi que dans les pays montagneux, le parcours des pentes, peu accusées, a pu être facilité par glissement sur neige durcie, ou par entraînement au sein d'une avalanche. Le glissement de blocs sur neige durcie permet d'expliquer la formation de "moraine de névé" ou de "nivation". Au printemps, le dégel libère de nombreux blocs, au moment où les pentes sont encore couvertes de plaques de neige. Après avoir glissé, les blocs vont s'accumuler très bas dans la pente, en formant des sortes de bourrelets à extrémités très pentues, semblables à une moraine frontale, qui ne doit rien au mouvement propre de la neige ou du névé.

E. HOWE, dans le Colorado, attribuait ces accumulations de blocs, nettement différentes des éboulis classiques à de grands écroulements qu'il appelait "rock-stream" (2).

c) Enfin, toutes ces considérations sur la distance de recouvrement, le volume, l'énergie libérée devraient nous permettre, à la suite d'une étude statistique, d'avancer très loin dans la compréhension du mécanisme de l'écroulement et de faire des prévisions. Mais seul, l'ordinateur semble capable d'absorber les nombreuses données d'un écroulement et d'en donner des corrélations simples entre la fracturation, le volume, la hauteur de chute, la superficie de recouvrement et le déclenchement d'un mouvement secondaire, ayant sa vitesse propre et susceptible d'accroître le déséquilibre du versant.

III°, B - LES GLISSEMENTS PROPREMENT DITS (LANDSLIDES).

III°, B 1 - Rappel des différentes définitions proposées dans la littérature.

Mr BERNARD (1927), professeur à l'école des Eaux et Forêts, donne dans son cours sur la "restauration des montagnes" la définition suivante :

" Dans les glissements, les matériaux se déplacent en se gênant mutuellement, et dans ces conditions, il ne se produit aucun triage ; les éléments gros ou petits sont toujours confusément mélangés, ce qui fait que le profil en long d'un glissement peut ne pas présenter la régularité que l'on constate dans une nappe d'éboulis. "

(1) - Pour l'écroulement de Goldau (1806, Suisse), HEIM a calculé que l'énergie libérée dépassait certainement 100 millions de kWh.

(2) - On parle aussi souvent de "talus glacier", de "rock river", de "rock glacier", de "coulées de pierres ou de blocs", de "glaciers rocheux".

Pour SHARPE (1938), le glissement de terrain représente "tout mouvement perceptible vers le bas d'un versant d'une masse de terre, de roches ou les deux à la fois, le degré d'humidité étant relativement peu élevé". Il suppose cependant la présence d'eau "en quantité suffisante pour qu'il y ait lubrification d'une surface de glissement".

Léon MORET (1945) réserve le terme de glissement de terrain au "mouvement de sols, dû à la présence de formations argileuses ou marneuses plastiques, en général d'origine glaciaire".

K. TERZAGHI (1950), définit les glissements proprement dits comme "le déplacement rapide d'une masse de roche ou de sol dont le centre de gravité se déplace vers le point bas du versant".

Pour J.D. VARNES (1958), "les glissements sensu stricto sont le résultat d'une rupture par cisaillement suivant une ou plusieurs surfaces qui sont soit visibles, soit raisonnablement déductibles".

Les divers éléments importants pouvant servir à l'élaboration d'une définition sont donc :

- un mouvement de masse et un déplacement horizontal
- un effort supplémentaire qui sera le cisaillement.
- l'existence d'une ou plusieurs surfaces de faiblesse.

Nous aboutirons à une définition générale :

Le glissement s. t. (landslide) consiste dans le déplacement plus ou moins continu, lent ou rapide d'une masse de terre, de roches, suivant une ou plusieurs surfaces de faiblesse définies, visibles ou non et de formes diverses.

III°, B 2 - Classification.

On adoptera quatre critères principaux de classement :

- la fragmentation du matériau :
 - + fragmentation peu importante, mouvement d'une seule masse.
 - + fragmentation en de nombreux éléments.
- le type de matériau :
 - + roches.
 - + sols, terrain meuble.
- la forme moyenne de la surface de glissement :
 - + courbe.
 - + plane.
- la distance de recouvrement :
 - + recouvrement et déplacement peu importants.
 - + recouvrement important.

La vitesse et la teneur en eau étant très variable dans ce groupe de mouvements, nous les considérons comme des critères secondaires.

Nous décrirons successivement :

- les glissements à fragmentation et à recouvrement faibles :
 - + les glissements dits "rotationnels" (slump).
 - + les glissements plans de gros blocs (block-slide).
- les glissements à fragmentation et à recouvrement importants.
 - + les glissements de roches (rockslide).
 - + les glissements de débris (debris-slide).
 - + les ruptures par étalement latéral (failure by lateral spreading).

III°, B 2-I - Les glissements où la masse de matériaux en mouvement se déforme et se fragmente très peu sous l'effet d'un déplacement total en général faible.

La masse est fragmentée en éléments de glissement, peu nombreux dont les dimensions sont en général plus grandes que "le déplacement relatif du centre de gravité de toute la masse".

Les glissements sensu stricto, supposent une rupture selon une surface de faiblesse définie que l'on appelle surface de glissement (slip-surface - failure surface) ; elle peut être de forme diverse et a pour origine :

- soit une surface ou une ligne structurale ou une combinaison de surfaces élémentaires.
 - + plans et joints de stratification provoquant ce que l'on nomme parfois "décollement de couches".
 - + failles.
 - + joints de rupture (ils sont à l'origine, souvent, de ce que l'on appelle "décoiffement de tête anti-clinale).
 - + plans de schistosité, de foliation faisant intervenir une multitude de petites surfaces élémentaires orientées dans une même direction.
- soit une surface de contact entre matériaux de propriétés différentes.
 - + limite terrains de couverture - substratum rocheux.
 - + limite argile molle - argile tenace.
- soit une surface gauche (assimilée souvent à une cycloïde) dont l'apparition est instantanée au sein d'un matériau homogène, ou considéré comme tel, et impose à la masse un mouvement approchant la rotation.

Nous distinguerons deux types principaux de mouvements affectant aussi bien les roches dures que les sols et terrains meubles.

III°, B 2-11 - Le "SLUMP".

Ce terme est assez difficile à traduire correctement en français ; on parle généralement de "glissement rotationnel" ou de "glissement en cuillère". Nous préférons, pour plus de commodités, garder le terme anglais de "slump" (1).

Ce type est le plus connu et a servi de base pour toutes les études fondamentales de calcul de stabilité de talus reposant sur l'existence plus ou moins hypothétique d'une surface de glissement assimilable à un cercle. La forme de cette surface conditionne, lors de la rupture, un mouvement de rotation d'arrière en avant suivant un axe parallèle au talus. On distingue habituellement deux grands types de forme :

- une forme de courbe gauche, concave, à pente forte vers le haut du versant et très aplatie vers le bas ; elle correspond à la forme dite en "cuillère" (spoon shaped failure) ou encore en "fauteuil" avec un "dossier" (partie courbe) et un "siège" (partie rectiligne). Cette dernière forme nous permet de faire la transition avec les surfaces planes provoquant des translations dont nous reparlerons. La majeure partie des cas de "slump" se rattache à la forme de courbe gauche.
- la surface de glissement peut être aussi assimilable à un cercle ; on se fonde sur ce type de forme pour définir le facteur de sécurité, vis à vis de la rupture des talus édifiés par l'homme et que l'on peut considérer alors comme homogènes. Disons tout de suite que ce cas est très rare dans les sites naturels et qu'il est vain, dans la plupart des cas, d'essayer d'appliquer strictement les théories de la stabilité.

Les figures 8 a à 8 h, nous montrent d'ailleurs que les formes sont diverses et directement influencées par des lignes et plans structuraux tels que failles, joints, stratification.

La masse glissée du fait de la "rotation", ne recouvre que très faiblement le pied du versant, et, une fois, la rupture finale déclenchée, le versant tend à retrouver un nouveau profil d'équilibre. Toutefois, dans les terrains meubles, la masse glissée soumise aux agents atmosphériques peut se remettre en mouvement et ce, souvent sous

(1) - Le terme de "Slump" sera réservé à la description des glissements dits "rotationnels" affectant des versants naturels, tandis que celui de "slipout" concernera les mouvements affectant les talus de voies de communication.

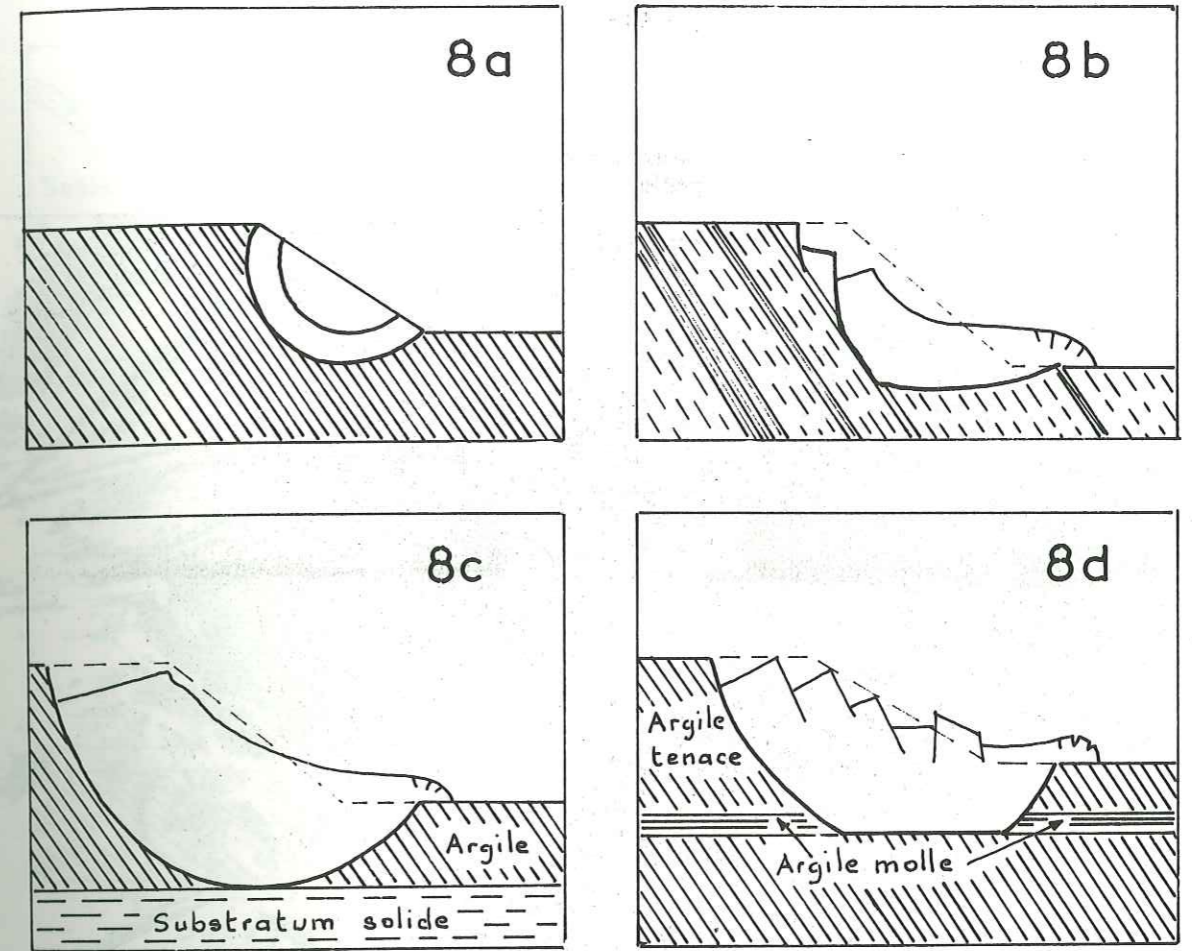


Fig 8 Différents types de "SLUMP"

8a : Slump dans un matériau homogène - cercles de glissement.

8b : Slump dans un matériau non homogène - Surface de glissement empruntant une couche de moindre résistance et pentée.

8c : Rupture par la base dans un matériau homogène - "Cercle" de glissement tangent au substratum solide.

8d : Rupture par la base dans un matériau non homogène - Surface de glissement empruntant des couches d'argile molle.

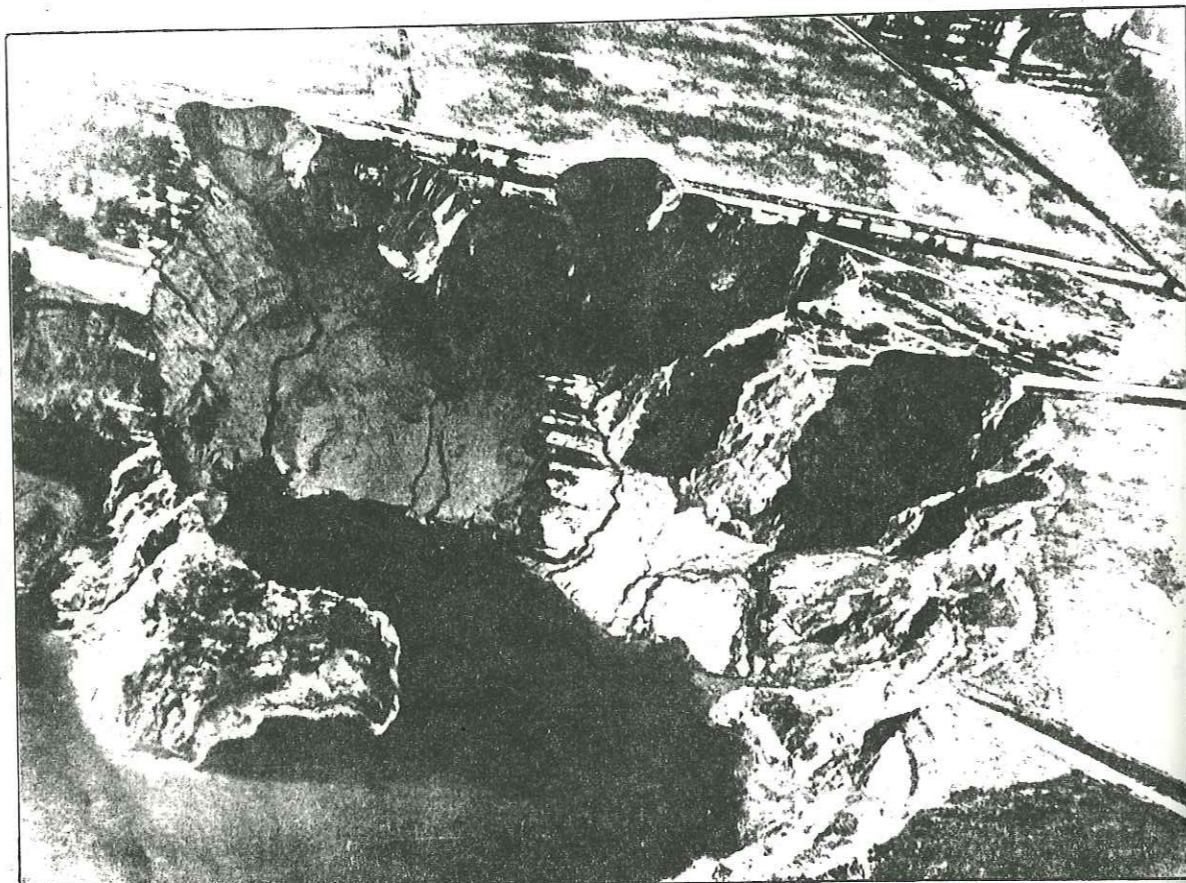


Fig. 9 - "Slumps" multiples dans des graviers et argiles varvées formant les berges du lac F.D. Roosevelt, en avril 1952. La structure alvéolaire s'est créée en quelques jours. Auparavant en 1912 et 1944 il y avait déjà eu des petits glissements. (Photo F.O. JONES - U.S. Geological Survey).

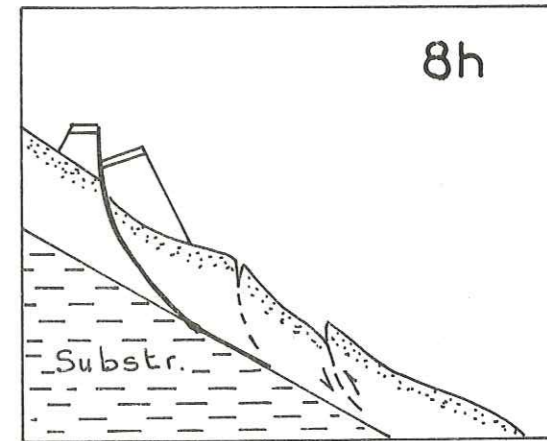
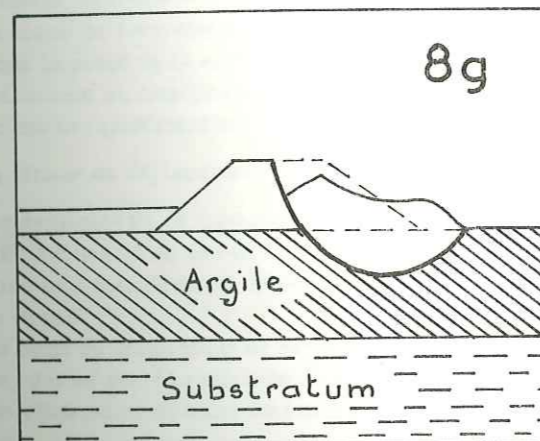
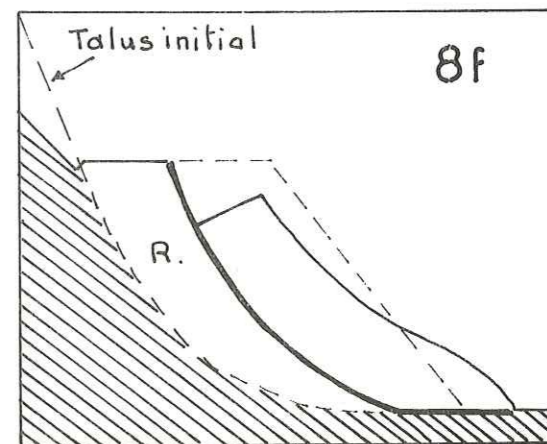
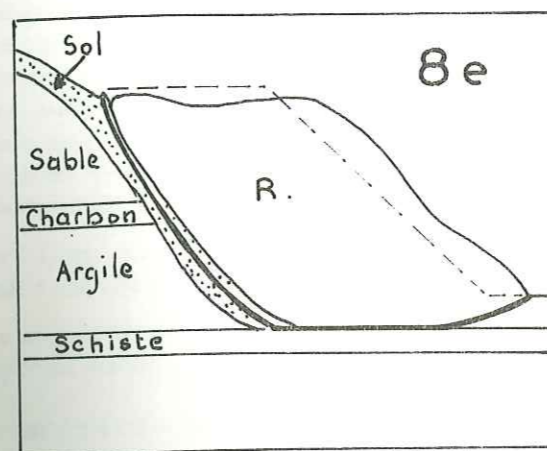


Fig 8 (suite) Différents types de "SLUMP"

- 8e : Glissement contrôlé par un sol à faible résistance, sur lequel repose les déblais.
- 8f : Rupture à l'intérieur d'un déblais.
- 8g : Rupture de digue.
- 8h : Glissement dans un remblai reposant sur un terrain naturel en pente.

a forme de coulée ; on a alors pour un même site, deux mouvements distincts : le slump et la coulée, que les Anglo-Saxons ont pris l'habitude de décrire sous l'appellation de "slump-earthflow".

Les mouvements de "slump" et de "slump-earthflow" peuvent aussi s'étendre le long du versant affecté en formant des "multiple-alcove-landslides", la répétition des glissements provoquant l'intersection et l'interpénétration de nombreuses niches d'arrachement et aboutissant ainsi à une structure alvéolaire visible sur la figure 9. Ce processus est souvent rapide, au printemps 1952, la terrasse Reed (lac Franklin Roosevelt) présenta au bout de quelques jours une telle structure.

Le "slump", dans son ensemble (depuis l'apparition d'une fissure jusqu'à la rupture finale qui, elle, est rapide), se produit à une vitesse lente ou modérée (30 cm/an à 150 cm/jour).

Le volume des terres glissées est évidemment très variable selon les cas, mais en règle générale, il est beaucoup plus important que celui mis en jeu lors d'un mouvement plan que nous allons maintenant décrire.

III°, B 2-12 - Le glissement plan de blocs ou de masses rocheuses. (Block-glide, block-slide).

Ce type se différencie nettement du "slump". Le mouvement se résume en une translation d'éléments rocheux plus ou moins volumineux suivant une surface plane d'inclinaison variable.

La masse en mouvement peut chevaucher la surface originelle du pied de versant et progresser ainsi indéfiniment pourvu que la pente de la surface de glissement, et celle de la surface topographique, soient suffisamment fortes et que la résistance au cisaillement le long de cette surface reste inférieure aux forces de glissement. Le versant recouvre donc moins rapidement son état d'équilibre que lors d'une rupture du type précédent.

La vitesse de déplacement est en général lente à modérée.

Les exemples de ce type sont relativement nombreux. J. LETOURNEUR cite sur le bord des Causses, dans l'Aveyron, l'affaissement d'un pan de falaise calcaire jurassique, dû à la déformation du lias marneux sous-jacent. Il y a eu dislocation sans écroulement, le déplacement du bloc ne fut pas très important et le mouvement semble, à l'heure actuelle stoppé. *non : affaissement à base de fluage*

Au cours du creusement du canal de Panama, les ingénieurs ont eu à lutter contre de nombreux glissements de ce genre, dus au peu de résistance d'un conglomérat supportant des andésites.

Les glissements de blocs sont soumis, comme les écroulements à des conditions strictes de fracturation et de structure.

- la fracturation doit être continue aussi bien vers l'arrière du versant que latéralement de façon à permettre la délimitation en compartiments.
- le plan de glissement consiste en un substratum tendre susceptible de se déformer sous le poids du compartiment rocheux.
- ce type de mouvement affecte surtout les roches dures, mais on connaît des block-glides dans des terrasses faites de loess.

Les glissements de blocs évoluent la plupart du temps en écroulements des éléments détachés de leur paroi originelle. Ce fut le cas du block-glide à la pointe Fermin près de Los Angeles en Californie. Le mouvement principal fut un glissement selon une couche tendre pentée vers la mer ; la vitesse moyenne de déplacement était de l'ordre de 3 cm/semaine avant l'écroulement complet de la falaise.

D'après les études de N. I. SOKOLOV sur le processus de "délogement" de blocs, à partir d'une masse rocheuse donnée, nous citerons quelques formes caractéristiques de glissements plans (1) observés par les géologues russes.

a) Glissement de blocs du type Angara (du nom de la rivière Angara).

" Le glissement se produit dans des roches massives, dures, non homogènes et fracturées parmi lesquelles des

(1) - Les deux termes "Block-glide" et "Block-slide" semblent définir un même processus que nous avons décrit comme étant le glissement plan de masses rocheuses. Toutefois certains auteurs y verraient une nuance. Pour I. A. PREOBRAZHENSKII (1920), le block-glide serait un block-slide très rapide dans lequel tous les blocs indépendants s'écroulent à plus ou moins court terme, pour former des empilements de rochers au pied du versant ; ZOLOTAREV et ROGOZIN préférèrent alors parler de "slide-fall".

alternances de couches perméables et imperméables ou argileuses fournissent des conditions idéales de glissement dès la moindre humidité". Il suffit d'une pente, même peu accusée, pour qu'il y ait mouvement le long du plan de stratification ou de failles ouvertes. Le processus est le suivant : le bloc se détache, glisse et s'écroule dès qu'il est en porte à faux ; un deuxième bloc se détache à l'étage supérieur et ainsi de suite (voir figure 10). Les dimensions des blocs et les volumes de roches sont considérables ; SAKHAROV (1950) parle de massifs affectés par de tels processus jusqu'à des profondeurs de 2 à 3000 m. N.I. SOKOLOV, de 1941 à 1947, a pu vérifier l'importance de ces dimensions lors d'études effectuées entre les lacs Lama et Khantaika. Il avait affaire à des calcaires, des schistes et des couches charbonneuses ; et il avait pu voir ainsi des blocs glissés, de dimensions importantes (de 100 à 1000 m de longueur, de 10 à 100 m de largeur et de 10 à 80 m d'épaisseur) ; les fractures, situées en arrière des blocs, ayant jusqu'à 100 m de large.

b) Glissement de blocs du type labyrinthe.

L'exemple est pris sur la rive droite de la rivière Khosta vers les rivages de la Mer Noire, à la limite d'un anticlinal à couches pentées de 10° à 23°. L'érosion a enlevé les dépôts tertiaires, laissant à nu la surface du calcaire sénonien épais de 5,5 m et disloqué en gros blocs par une série de fractures tectoniques suivant trois directions. La plupart de ces fractures sont remplies de débris, mais l'érosion en a enlevé la plus grosse partie si bien qu'il ne reste plus qu'un dédale de blocs glissés.

La surface de glissement correspond à un plan de stratification de l'unité supportant la dalle calcaire. Des arbres vieux de 300 à 500 ans, qui ont pu pousser entre les blocs, indiquent grossièrement le temps de formation du labyrinthe dû à un glissement et à un tassement. (voir figure 11).

c) Glissement de blocs du type Ilim.

Ce type se développe dans les roches dures, très fracturées, reposant sur des couches tendres et imperméables. Il y a glissement de blocs sous forme de colonnes étroites de roches préalablement isolées par des fractures remplies ou non de débris. Ce type évolue assez rapidement en écoulement (voir figure 12).

III°, B 2-2 - Glissement à fragmentation importante et à fort recouvrement.

La masse en mouvement se fragmente en de nombreux éléments, de taille réduite, par rapport au groupe précédant ; on emploie d'ailleurs souvent le terme de débris, (glissement de débris) pour ces types de glissement.

Les matériaux éboulés peuvent donc recouvrir une surface appréciable, en pied de versant.

Les glissements décrits dans ce paragraphe ne sont pas nécessairement contrôlés par des surfaces de glissement nettement définies. Si de telles surfaces existent, elles peuvent avoir les mêmes origines que celles décrites plus haut. Il est à noter cependant, que la forme la plus fréquente est celle d'un plan et que par conséquent, le mouvement sera essentiellement une translation.

Nous distinguerons ici trois types principaux de mouvements pour lesquels interviennent le critère de nature de matériaux et d'une façon plus ou moins précise celui de degré d'humidité.

- 1 - Le glissement de roches (rockslide) dans les roches dures.
- 2 - Le glissement de débris (débris-slide) dans les sols, les terrains meubles facilement altérables.
- 3 - La rupture par étalement latéral et soudain (failure by lateral spreading) dans les sols argileux.

III°, B 2-2-1 - Les glissements de roches.

On définit ce type comme le mouvement habituellement rapide de roches ou de plaques de roches glissant sur banc, pour venir former au bas de la pente, une accumulation de blocs de granulométrie plus ou moins homogène.

Ce genre de glissement se rencontre essentiellement dans les séries sédimentaires à pendage conforme à la pente naturelle du versant. Il a lieu le plus souvent suivant des plans de stratification ; toute autre ligne structurale telle que failles, joints, microplis, ainsi que la présence d'interlits argileux ou schisteux, peuvent favoriser grandement le phénomène.

(1) - L'homogénéité de la granulométrie dépend beaucoup de la maille et de la densité des joints de stratification des fractures perpendiculaires à ces joints.

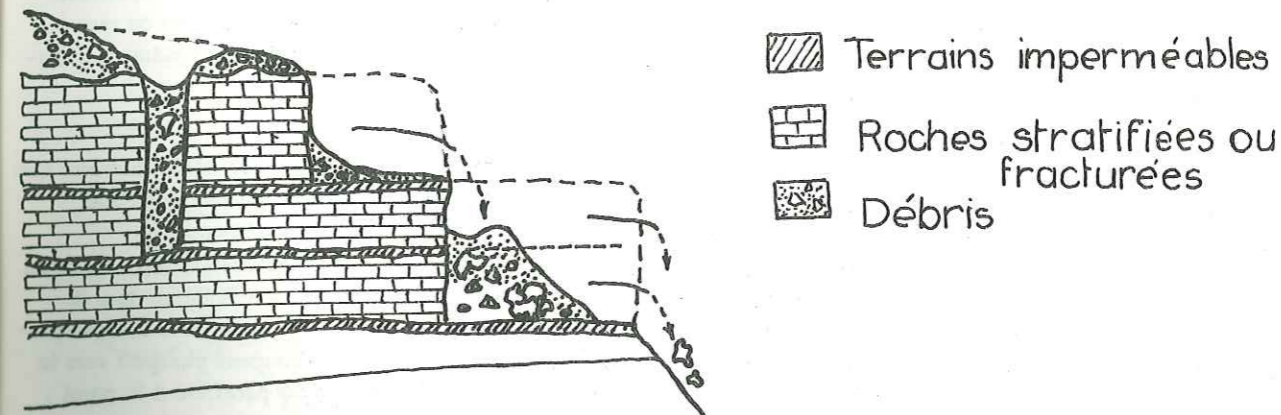


Fig. 10a Glissement de blocs du type Angara d'après N. I. SOKOLOV.

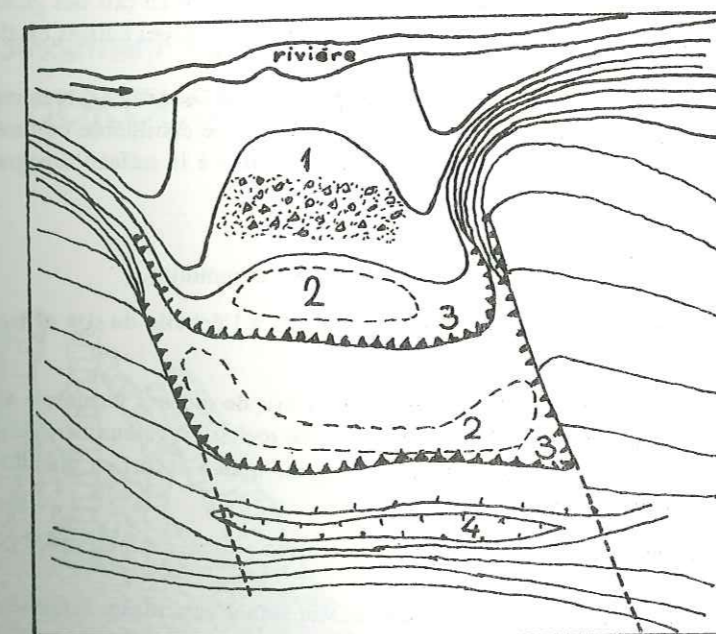


Fig. 10b Glissement de blocs du type Angara (vu en plan) d'après N. I. SOKOLOV.

- 1. matériaux éboulés - 2. dépressions entre les blocs
- 3. crevasses limitant les blocs - 4. dépression en tête du mouvement

Le mouvement est en général rapide ; dans la littérature les vitesses varient entre 0,8 et 20 m/s pour la phase finale de rupture et la durée totale du glissement est de 1 à 4 minutes. Les départs d'éléments sont brusques, et n'intéressent pas toujours toute la masse à la fois ; on a ainsi, après la rupture principale, une série de petits glissements de roches, s'échelonnant dans le temps.

La tranche de roches affectée est généralement peu épaisse par rapport aux "slump" et au "block-glidè", mais suivant les limites latérales tectoniques ou morphologiques du glissement, on peut atteindre de grandes superficies occasionnant ainsi un recouvrement important du pied de versant. Ce recouvrement consiste, la plupart du temps, en un amoncellement de blocs anguleux ; il est possible toutefois, de retrouver des bancs entiers complètement dissociés ayant l'aspect de dalle de béton éclatée.

Nous citerons quelques exemples :

Le glissement de roches déclenché dans la vallée de la rivière Gros Ventre, (Wyoming), en 1925, intéresse une masse de 35 000 000 m³ parcourant une distance totale de 500 à 650 m. Le mouvement s'est produit selon une couche d'argile saturée, intercalée entre des calcaires et des grès pentés de 18 à 21° vers la vallée.

Les fjords norvégiens de la côte ouest ont été le siège de nombreux "rockslides". Un exemple typique est celui qui eu lieu le 13 septembre 1936 au Sud du lac Loen (côte sud-ouest de la Norvège). Le versant est situé dans le gneiss et s'élève sous l'angle moyen de 50° à une hauteur d'environ 1200 m au-dessus du niveau du lac. Dans sa partie centrale, sur une hauteur de 500 m, le talus est pratiquement vertical, les plans de glissement plongent vers le lac avec un angle de 65°. La roche est très fracturée et l'orientation générale des fissures est parallèle à la paroi ; au cours d'un violent orage, la roche située entre la paroi verticale et l'une des fissures se mit en mouvement et descendit vers le lac. Environ 1 000 000 m³ tombèrent brusquement et en une seule fois, dans le fjord, produisant une vague de 60 m de hauteur. Nous citons dans les pages suivantes, sous forme de tableaux, d'autres exemples de ce genre (tableau n° 9).

Les mouvements appelés "écroulement par clivage de couches" (L. MORET) sont en fait des glissements de roches, et il en existe des manifestations nombreuses dans les schistes cristallins des Alpes Suisses où ils portent d'ailleurs souvent le nom de "glissements de plaques".

Un autre exemple dont nous reparlerons est celui de la catastrophe de Vaiont Longarone (survenue dans la nuit du 9 octobre 1963), où une partie du mouvement (dans la zone supérieure) peut être considérée comme un glissement de roches dans les calcaires du Dogger, pentés vers la retenue conformément à la surface topographique.

III°, B 2-2-2 - Les glissements de débris.

Ce type se distingue du précédent par la nature du matériau et le degré d'humidité.

- un glissement de roches affecte des roches, dures, homogènes à l'échelle du site et fracturées. La pesanteur y joue un grand rôle.

- un glissement de débris affecte des terrains meubles, les débris de roches, les débris d'altération ou toute masse plus ou moins argileuse renfermant en son sein des fragments de roches (anguleux, arrondis, en plaquettes). L'eau joue un rôle important en réduisant la résistance au cisaillement, mais l'apport en grandes quantités n'est pas une condition nécessaire au déclenchement du mouvement.

La surface de faiblesse consiste souvent en la limite terrains d'altération - roches saines, mais elle est rarement définie d'une façon nette.

Il est préférable alors de parler de zones de faiblesse. Le mouvement sera d'autant plus favorisé que le contact roches altérées - roches saines sera penté conformément au versant.

Les glissements de débris sont très localisés ; les vitesses de déplacement sont rapides. Le volume des terres glissées est variable et peut se traduire par un recouvrement plus ou moins important. Il en résulte une topographie moutonnée comparable à celle des paysages morainiques actuels.

Une fois la rupture principale déclenchée, le glissement de débris évolue souvent en coulées susceptibles d'obstruer les vallées.

Une grande partie des glissements actifs des Alpes se rapportent à ce type. Nous avons pu constater en effet qu'il y a très fréquemment il y a remise en mouvement localisée, dans des pentes anciennement glissées.

Le glissement du canal de Gap, au col Bayard, en est un exemple, du moins en partie. En 1936, à la suite, semble-t-il, de grosses pluies, un mouvement important (en 1906, il y avait déjà eu quelques désordres) se déclen-

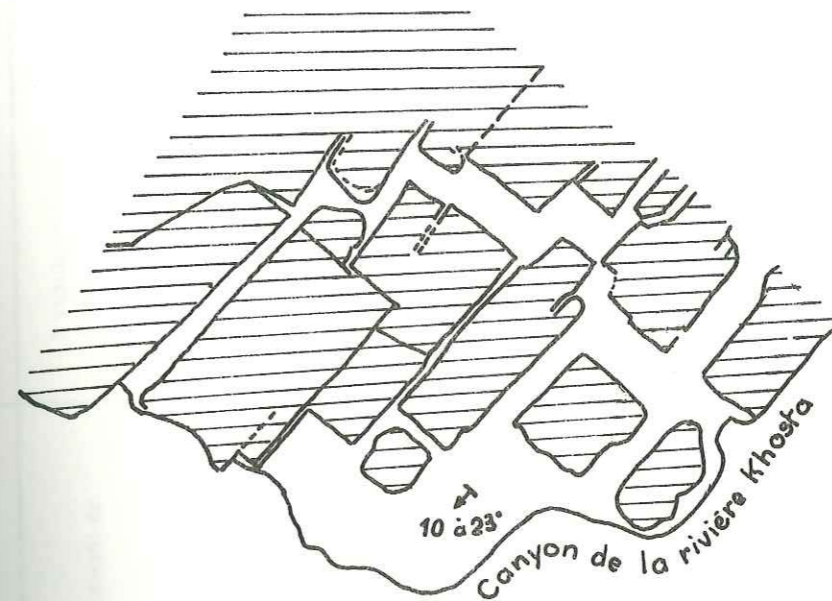
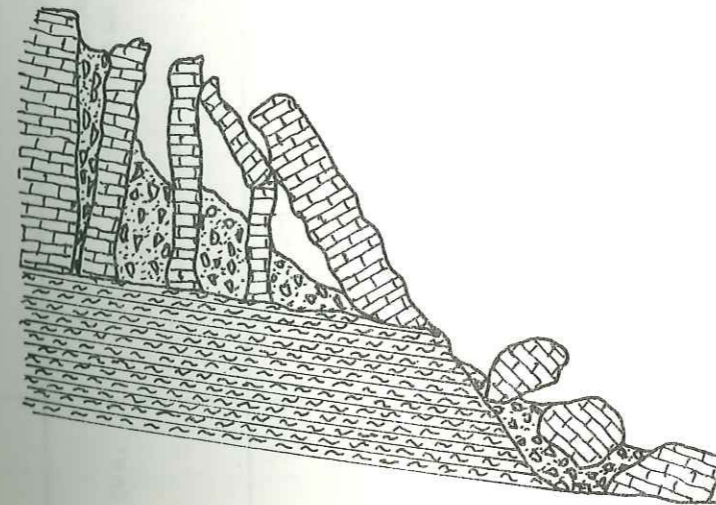


Fig.11. Glissement de blocs du type labyrinthe d'après N.I. SOKOLOV et Yu.K. KAMINSKII (vu en plan).



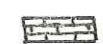


-  Calcaire
-  Marnes ou argiles
-  Fragments. Débris.

Fig.12. Glissement de blocs du type Ilim d'après N.I. SOKOLOV.

TABLEAU N° 9 - VAGUES CAUSEES PAR DES ECROULEMENTS

Lieu, date, heure de la catastrophe.	Mécanismes générateurs	Conséquences
Péninsule Shimabara Japon, 21 mai 1772 à 20 h.	<ul style="list-style-type: none"> - Période de tremblements de terre et de volcanisme. - Glissement de roches et de sol de 490 000 m³, dans un versant de pente = 10°. - Hauteur de chute = 510 m 	<ul style="list-style-type: none"> - 3 vagues de hauteur moyenne de 10 m dans la baie Shimabara profonde de 63 m.
Langfjord, Norvège 22 février 1756	<ul style="list-style-type: none"> - Glissement de roches de 11 000 000 m³ déclenché sur le versant du fjord penté de 25° - Cause probable : pluies torrentielles - Hauteur de chute : 390 m 	<ul style="list-style-type: none"> - 3 vagues de hauteur moyenne de 40 m dans le fjord profond de 300 m au maximum. - Effets ressentis jusqu'à 40 km du glissement.
Tafjord, Norvège 7 avril 1934 à 3 h.	<ul style="list-style-type: none"> - Eroulement de 140 000 m³ de rochers. - pente moyenne du versant = 45° - Hauteur de chute = 870 m - Largeur de l'éroulement = 225 m - Cause probable = gel et dégel dans les fissures. 	<ul style="list-style-type: none"> - 3 vagues de 60 m de hauteur maximum - vitesse des vagues = de 20 km/h à 42 km/h.
"Reed-Terrace" U.S.A. Lac F. Roosevelt du 8 avril 1944 au 10 août 1953.	<ul style="list-style-type: none"> - Pente du versant = 23° - Le 10 avril 1952 : glissement de 10 000 000 m³ de sédiments fluvio-glaciaires. - Hauteur de chute maximum = 63 m. 	<ul style="list-style-type: none"> - Plusieurs vagues (11) de hauteur maximum = 20 m - Vitesse = 70 km/h.
Lituya Bay - Alaska 9 juillet 1958	<ul style="list-style-type: none"> - Glissement de roches de 28 000 000 m³ - Hauteur de chute = 900 m - Rejeu de la faille Fairweather causé ou accompagné par un tremblement de terre. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vague de hauteur maximum = 522 m - Vitesse probable = 150 km/h à 200 km/h.
Vajont-Longarone (Italie) 9 octobre 1963 à 22 h 39 Lac de barrage	<ul style="list-style-type: none"> - Glissement de roches 300 000 000 m³ sur un front de 2 km - Pendage conforme - surface de glissement "en fauteuil" - L'arrachement domine la retenue de 550 à 700 m. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vague de 30 000 000 m³ d'une hauteur moyenne de 100 m - Destruction du village de Longarone.

dans les moraines et les couches d'altération des "terres noires", vraisemblablement au contact "terres noires" saines - "terres noires" altérées, ou moraines - "terres noires" altérées. Ce glissement est en fait une reprise dans un grand ensemble, déjà glissé, dont on voit nettement les contours en photos aériennes. Les formes caractéristiques de tout mouvement de terrain sont très remarquables dans la topographie. La niche d'arrachement principale rappelle celle d'un "slump" par sa forme concave et en arc de cercle.

Nous citerons deux autres exemples, quelques peu différents, où les matériaux mis en cause sont des schistes très altérables.

Dans le district de Dunedin, en Nouvelle Zélande, W.N. BENSON a pu observer des glissements de débris dans des schistes à grosses concentrations d'albite et de chlorites disposées en zones parallèles à la schistosité. La masse schisteuse était de plus, fissurée sous l'effet de nombreux joints transversaux perpendiculaires à la schistosité. L'eau pénétrant par ces fissures a favorisé la transformation de nombreux minéraux en argile molle. Le glissement de la centrale hydroélectrique de Waipori affecte des schistes altérés plus ou moins profondément. Le mouvement lent et superficiel a été détecté par l'apparition de petits "coups de cuillère" ainsi que par la fissuration des conduites et de la galerie d'amenée d'eau. On a pu déterminer des zones d'activation maxima aux endroits où la couche d'altération des schistes était la plus épaisse (60 m). Le glissement quoique localisé, ne présentait pas des formes et des contours nets ; le mouvement fut relativement lent : 10 cm en 15 jours.

Le deuxième exemple sera pris aux alentours de St-Etienne. Lors des travaux d'élargissement de la R.N. 88 entre St-Etienne et St-Chamond, les Ponts et Chaussées ont enregistré un certain nombre de glissements affectant des schistes se présentant sous forme de plaquettes (allant de quelques millimètres à vingt centimètres d'épaisseur), dans lesquels s'interposent des lentilles d'argile ou de charbon ou de grès durs mais très sensibles à l'action des agents atmosphériques. Au lieu-dit "les Baraques" une fissure est apparue sur 150 m de long et le matériau comparable à une série de plaquettes, passablement cassées, s'est mis à glisser et a formé localement des petites coulées. La présence d'eau n'est, semble-t-il, pas à mettre en cause, "les glissements ayant commencé après une longue période de sécheresse" (FOURNEL), par contre les travaux d'élargissement sont certainement la cause probable du mouvement. La pente moyenne de la zone de faiblesse représentant la somme de surfaces élémentaires, était de 18° à 20°. Le pourcentage de recouvrement fut faible.

III°, B 2-2-3 - Rupture par étalement soudain et latéral.

Ce type de glissement peut être défini comme "la rupture brusque se propageant rapidement latéralement et longitudinalement, dans des terrains meubles très argileux."

Le mouvement peut se produire sur des pentes même très faibles.

Le mode de déplacement est assez complexe, impliquant à la fois la rotation et la translation, la liquéfaction et l'écoulement. Mais le mécanisme principal reste la translation avec un début de "rotation" en tête du glissement. KJELMANN cite à cet effet le cas d'une quarantaine de maisons translatées de 140 m lors du glissement de Surte.

La surface de glissement consiste la plupart du temps en une zone de haute pression interstitielle dans une argile homogène, ou en une couche d'argile molle (soft) au milieu d'une masse d'argile tenace (stiff).

Au sujet des mécanismes de ce genre de mouvement, deux théories s'affrontent :

a) W. KJELMANN (1955) essaye de clarifier ce phénomène en parlant de glissement par rupture successive (la succession des ruptures étant rapide).

Dans un petit glissement, la masse de terre est considérée comme un corps unique et rigide ; ceci implique que les faiblesses se produisant simultanément dans toutes les parties de la surface de glissement.

Dans un grand glissement, on pense que les mouvements sont composés ; une masse de sol commence à glisser et ensuite, les masses adjacentes se mettent en mouvement si bien que le glissement final s'accroît latéralement de proportions importantes.

Il différencie ainsi deux types principaux :⁽¹⁾

- le glissement "rétrograde" (retrogressive failure) où le mouvement s'agrandit dans le sens opposé à la direction normale de glissement (fig. 13).

(1) - La nomenclature de KJELMANN pourrait être d'un grand intérêt pratique du point de vue classification, car le glissement rétrograde ou progressif de la rupture est relativement facile à déceler. Les glissements rétrogrades seraient les écroulements, les slumps, les glissements de roches. Les glissements progressifs seraient les coulées.

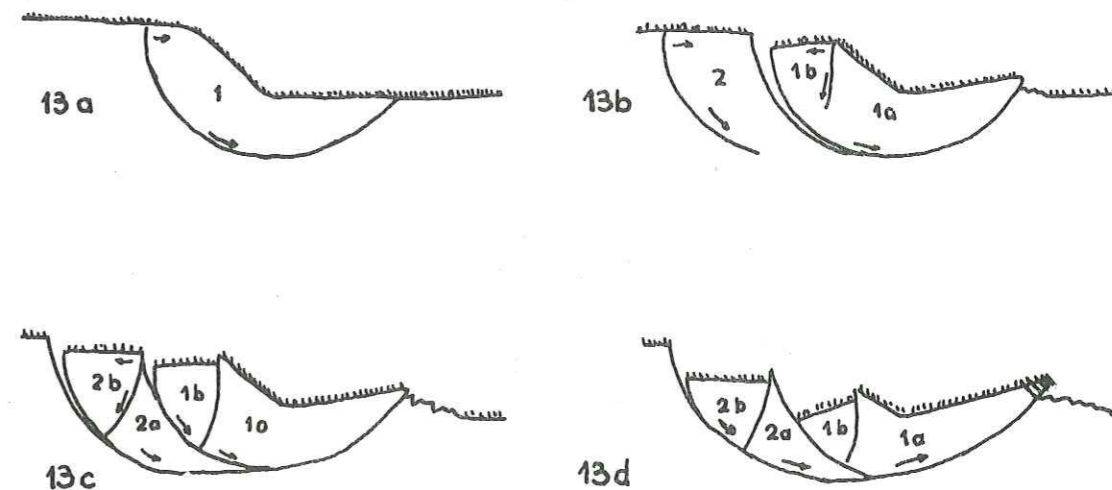


Fig.13. Glissement rétrograde.

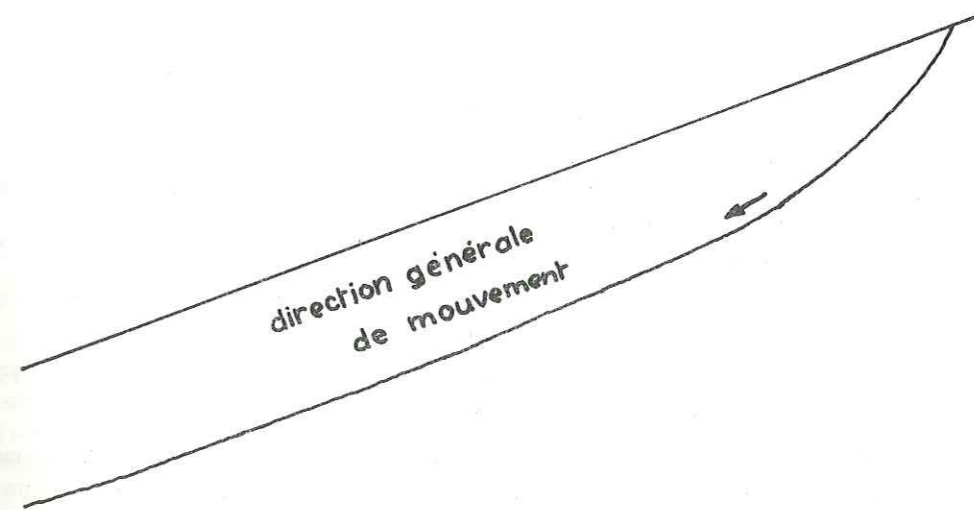


Fig.14. Glissement "progressif".

- le glissement "progressif" (progressive failure) où la rupture s'accroît dans la direction normale de mouvement (fig. 14).

b) L. BJERRUM (1955), se basant sur l'activité et la sensibilité des argiles, conclut qu'il n'y a pas succession de ruptures, mais une faiblesse, gagnant instantanément toute la masse argileuse. K. TERZAGHI semble être de cet avis et ajoute en plus qu'aucun signe avant-coureur ne permet de prévoir la rupture finale.

En conclusion, les caractéristiques de ce genre de mouvement sont :

- rapidité et soudaineté du mouvement.
- présence d'une masse argileuse.
- rupture sur pente faible.
- mouvement de translation dominant.
- possibilité d'accroissement du mouvement.
- rôle de la pression d'eau interstitielle et de l'ameublissement des couches.

III°, C - LES COULEES.

III°, C 1 - Définition.

La coulée est le mouvement affectant une masse de matériaux non consolidés, en général terreux ou argileux, dont le déplacement rappelle par sa forme et la distribution des vitesses, l'écoulement d'un liquide très visqueux.

III°, C 2 - Caractéristiques des coulées.

Par rapport aux glissements proprement dits ou aux écroulements, les coulées présentent les particularités suivantes :

a) Il n'existe pas de surface de glissement, mais plutôt une surface d'écoulement, la coulée se déplaçant au hasard sur le fond d'un talweg, sur une surface plane ou bosselée.

b) Les matériaux affectés sont des matériaux meubles. Les coulées sont essentiellement terreuses, boueuses, et contiennent une grande proportion d'argile et de produits fins, du type limon, enrobant des fragments de roches de tailles et de formes diverses. A ce sujet, toute étude de coulée devra permettre, autant que possible, d'apprécier d'une façon approchée les pourcentages des différents constituants : blocs et matrice argileuse ou limoneuse.

c) Le phénomène se déclenche en général quand le terrain a atteint une certaine teneur en eau, limite, capable de rendre la masse semi-fluide. L'eau peut être d'origine diverse.

d) Au cours de sa progression, la coulée s'accroît aux dépens des terrains meubles rencontrés dans le chenal d'écoulement, ou s'alimente en tête du mouvement par rupture rétrograde.

e) Les distances que franchissent les coulées sont sans commune mesure avec l'étendue couverte initialement par les matériaux, qui lui ont donné naissance. La distance de recouvrement est donc très importante :

- 2,5 km à Bellevaux-Vallon pour une pente de 12° (Haute-Savoie).
- 1,8 km au Chatelard pour une pente de 16° (Savoie-Bauges).
- 6,5 km à Verdaelen en Norvège.

f) Les coulées sont des phénomènes redoutables car il est difficile de prévoir la stabilisation naturelle ; elles peuvent se remettre en mouvement périodiquement, aux mêmes endroits, et prendre l'allure de véritables crues torrentielles.

g) Les vitesses de déplacement sont rapides.

III°, C 3 - Classification.

Les auteurs Anglo-Saxons font souvent une première distinction d'après l'étude de la teneur en eau globale de la coulée, ce qui les a amenés à parler de :

- coulée "sèche"
- coulée humide.

III°, C 3-1 - Les coulées "sèches" (dry flow).

Ce qualificatif peut paraître tout à fait paradoxal car le terme de coulée évoque obligatoirement l'écoulement d'une masse saturée d'eau. Mais certaines catastrophes naturelles ont amené des auteurs, comme D.J. VARNES et M.R. MUDGE, à définir une catégorie de coulée, où l'eau ne jouerait pas le rôle prédominant. N'ayant pu observer au cours de notre travail de tels phénomènes, nous n'en parlerons qu'avec prudence.

Les coulées sèches sont faites essentiellement de fragments de roches, on emploie d'ailleurs l'expression de "rock-fragment flow". Elles ont principalement deux origines :

- soit l'explosion volcanique, le cas est extrêmement rare. La coulée de Bandaisan au Japon pourrait être, d'après certains, un exemple de coulée sèche (les nuées ardentes ne sont pas considérées comme des coulées).
- soit un écroulement ou un glissement de roches très important. On parle alors respectivement d'avalanche d'écroulement (rockfall avalanche) ou d'avalanche de glissement (rockslide avalanche). Les avalanches d'écroulement sont assez fréquentes dans les régions montagneuses.

Nous citerons l'écroulement important de la crête Sawtooth (Montana, U.S.A.), qui fut à l'origine de trois générations de grandes coulées de pierres, que M. R. MUDGE a examinées et classées dans les avalanches d'écroulement.

Des roches carbonatées, très fracturées (Dévonien), reposant sur des marnes, (Crétacé) forment une crête haute de 2500 m, dominant la plaine alluviale de 900 m. Vers la fin du Pleistocène, cette falaise s'est écroulée trois fois en donnant trois nappes de matériaux d'un volume total de 595 000 000 m³ s'étendant sur 9,5 km de long, 4 km de large et 120 m d'épaisseur. Les blocs sont anguleux et très hétérométriques (1) (grosse quantité de blocs de taille diverse et présence de dépôts récents à faible pourcentage de particules fines). Ils forment donc des éboulis poreux, rappelant étrangement la forme générale d'une coulée. MUDGE y observe des rides et des sillons en arc de cercle, des formes lobées, des divagations, des digitations, une surface très moutonnée. Comparée à la coulée de terre ou de boue qui, elle, suppose un fort pourcentage de particules fines et une grande quantité d'eau, l'avalanche d'écroulement de la Crête Sawtooth représente d'après MUDGE un phénomène un peu particulier, que l'on peut définir comme "un exceptionnellement grand écroulement composé de débris de roches susceptibles de se mouvoir rapidement comme des coulées, mais en l'absence d'eau".

Cet exemple appelle quelques questions : les marnes sous-jacentes pouvaient-elles se mettre en mouvement sous l'effet de l'écroulement et permettre ainsi le fort recouvrement constaté ? L'absence de particules fines, qui pourrait être une des particularités des coulées sèches, est-elle originelle ou simplement due à un lessivage intensif ancien ?

Plus près de nous, la catastrophe d'Elm (Suisse) en 1881 rappelle aussi ce genre de coulée sèche. Le mouvement de départ est un écroulement (2) affectant une falaise de schistes dont un des flancs était exploité depuis un certain nombre d'années. 9 000 000 m³ parcourent 435 m verticalement en 55 secondes (écroulement), remontent sur le versant opposé jusqu'à une hauteur de 90 m avant de s'engouffrer dans la vallée et de s'écouler sur une longueur de 1,6 km à grande vitesse. Des témoins rapportent que le phénomène "fut précédé d'un grand vent et d'un nuage de poussière poussant devant lui des blocs, des arbres, des pans de mur ; tous ces matériaux s'écoulaient à la façon d'un liquide". VARNES conclut en mettant en cause les forces agissant dans les espaces "interblocs", espaces renfermant vraisemblablement un "air fortement comprimé", si bien que toute la masse devient "un véritable courant de densité animé d'une grande vitesse".

Ces deux exemples nous amènent donc à décomposer le mouvement total en deux temps :

- un premier temps qui est celui de l'écroulement important et très rapide, pouvant libérer un volume de matériaux considérable (les auteurs cités ci-avant parlent d'un volume minimum de 10 000 000 m³).
- un deuxième temps représentant, à la façon d'une coulée, le déplacement rapide de cette masse de matériaux, sur de grandes distances. Cette phase suivrait de très près la phase écroulement. (tableau 9 bis).

Pour finir, nous signalerons des formes mineures de coulées sèches mais cependant toutes aussi dangereuses les unes que les autres, c'est-à-dire les coulées de sable (sand-run) et les coulées de loess.

(1) - Les plus gros blocs faisaient 90 m de long et 15 m de large.

(2) - A. HEIM qui a étudié ce glissement, le classe dans les écroulements.

III°, C 3 - 2 - Les coulées humides.

Elles constituent la variété commune que nous avons l'habitude d'observer dans les Alpes et que nous appelons couramment coulée de boue ou de terre. Cette catégorie implique cette fois-ci, une forte teneur en eau rendant la masse semi-fluide, et un pourcentage important de matériaux fins.

Nous distinguerons deux types.

- Les coulées boueuses à matériaux relativement grossiers du genre "earthflow".
- Les coulées boueuses à matériaux fins du genre "mudflow".

III°, C 3-2-1 - Les coulées boueuses du type "earthflow".

C'est le type le plus fréquent dans nos pays tempérés humides. Elles se déclenchent surtout dans les matériaux grossiers à matrice argileuse importante telles que les moraines. Une fois le terrain saturé, il peut y avoir mise en mouvement sur une pente pas obligatoirement très forte, et formation d'une langue de boue ou de terre susceptible de s'écouler jusqu'au fond des vallées principales. La zone de départ est formée habituellement par des "coups de cuillère".

Les coulées se déplacent lentement ou rapidement suivant la teneur en eau du matériau, son pourcentage d'argile, la pente et la forme du versant ou du thalweg.

A la suite de A. CAILLEUX et de J. TRICART, il nous semble intéressant de diviser les coulées du type "earthflow" en deux groupes :

- a) les coulées localisées de versant.
- b) les coulées généralisées de fond de vallée ou coulées libres à faible pente.

a) Les coulées localisées de versant.

Elles sont très fréquentes, souvent catastrophiques et font partie du processus général d'érosion des régions montagneuses. Ces coulées empruntent la plupart du temps les talwegs (morts ou actifs).

Nous citerons l'exemple de la coulée de Bellevaux-Vallon étudié par L. MORET. Dans la nuit du 11 au 12 mars 1943, une grosse partie des pentes de la pointe de La Gay se crevasse et se met à glisser vers l'aval. Les habitants de la haute vallée furent alertés par un "formidable craquement" provenant du ravin de Chauronde (voir plan figure 15). Des masses énormes de terrains meubles, (éboulis, moraines, produits d'altération et de désagrégation du flysch schisteux et du crétacé marno-calcaire) minées par des venues d'eau et saturées par les ruissellements du torrent, se transforment en une coulée boueuse d'un volume que l'on a estimé à 2 000 000 m³.

Le premier mouvement semblerait correspondre à un slump ou à un glissement de débris.

La coulée progresse pendant les premières semaines de 200 m environ par jour, et devait causer de gros dégâts dans la vallée du Brevon. "Elle écrase d'abord les maisons de Chauronde (12 et 13 mars), puis la scierie Monet (15 mars) ; elle gagne vers l'amont et recouvre les maisons de Beauveau. Cette langue de boue barre le Brevon, provoquant la montée des eaux qui formeront un lac de barrage naturel de 1 000 000 m³. La coulée gonflée de plus en plus par les matériaux venant de l'amont, débordent vers le 3 avril et une branche latérale atteint les maisons de Malatraix pour s'étendre jusqu'au pont de Cherny."

Le 10 avril, lors de sa visite L. MORET, constate que la coulée s'accroît encore latéralement, forme un delta dans le lac, alors que la tête du mouvement semble stabilisée. Peu de temps après, elle atteindra le moulin de Porte et le Brevon se transformera momentanément en une "décoction de boue brunâtre".

Le sinistre s'est déclenché de façon subite, après une période de sécheresse de 2 ans ; l'automne 1942 fut très pluvieux et, dès cette époque, des crevasses étaient apparues au sommet du ravin de Chauronde (l'une des crevasses avait 100 m de long et 1 m de large).

J.M. AVENARD a étudié le matériau de la coulée. La teneur en eau à saturation complète peut être forte : 52,3 %. La perméabilité est élevée : 2,384 cm/s⁽¹⁾. Les limites de liquidité et de plasticité sont respectivement de 36 % et 24,8 %. Compte tenu de la forte perméabilité, l'eau doit pouvoir s'évacuer rapidement et ni la limite de liquidité, ni celle de plasticité ne semble devoir être atteinte suffisamment longtemps pour provoquer une remise en route naturelle de la coulée. En octobre 1960, alors qu'il avait plu très peu de temps auparavant, AVENARD notait une teneur en eau ne dépassant pas 20,3 %.

(1) - La coulée se présente comme une masse chaotique de matériaux très hétérométriques, de plus la matrice argileuse renferme de nombreux fragments de roches et des blocs dont les plus gros sont allongés dans le sens de la pente.

TABEAU N° 9 bis - DIMENSIONS DE QUELQUES "AVALANCHES D'ÉCOULEMENT ET DE GLISSEMENT"

GLISSEMENT	TYPE	CICATRICE			HAUTEUR DE CHUTE (m)	DISTANCE HORIZONTALE PARCOURUE (Km)	DEPOT		DATE	REMARQUES
		Hauteur (m)	Largeur (m)	Pente de la surface de glissement			Surface recouverte (Km ²)	Volume (million de m ³)		
SAIDMAREH, Iran (Harrison et Falcon 1938)	Glissement de roches	1470	14,4	en moyenne 20°	900	14,2	164	19 000	Préhistorique	les débris passent par dessus une crête haute de 450 m
FILMS, Suisse (Heim, 1932)	Glissement de roches	1950	-	environ 18°	environ 1200	15,9	41	11 450	Préhistorique	Pliétoène
D'OUSSOI, Pémir (Harrison et Falcon 1938)	Glissement de roches	1140	-	-	714	-	10	1 907	18-2-1911	---
SAWTOOTH RIDGE (versant est), Montana	Eroulement	60 à 380	9504	50 - 80°	60 à 380	4 (dépot n° 1)	11,5	environ 566	Préhistorique	3 phases d'éroulement finit Pliétoène
GOHNA, Inde (Holland, 1894)	Glissement de roches	995	environ 900	environ 54°	environ 1470	1,5	> 1,7	266	Sept. 1893	
GOLDAU, Suisse (Heim, 1932)	Glissement de roches	950	-	20°	environ 580	1,7	1,2	35,7	2 - 9 - 1806	Destruction de 4 villages 457 morts.
FRANK, Alberta (Mc Connell et Brock 1904)	Glissement de roches et éroulement	855	950	environ 45°	900	3,1	2,6	13,6	29 - 4 - 1903	Destruction d'une partie de la ville de Frank - 70 morts.
GROS VENTRE, Wyoming (Alden, 1928)	Glissement de roches	600	315	en moyenne 18°	environ 630	0,9	environ 0,8	35	23 - 6 - 1925	
MADISON CANYON Montana, (Wilkind et autres 1982)	Glissement de roches	390	660	30°	390	0,5	0,5	25,9	17 - 8 - 1959	28 morts.
ELM, Suisse (Heim, 1932 ; Conway, 1900)	Eroulement	315	-	environ 42°	540	1,6	environ 0,6	9	11 - 9 - 1881	Destruction du village 115 morts.

b) Les coulées généralisées de fond de vallée.

Elles se distinguent du type précédent par :

- une pente plus faible (7° à 10°).
- une surface beaucoup plus régulière.
- une superficie de recouvrement plus forte.
- un pourcentage de gros blocs plus faible.

Les coulées boueuses de Vailly-Lullin (Hte-Savoie, au Sud de Thonon) en sont un exemple. Depuis des années, les moraines argileuses tapissant la vallée du Brevon sont instables. Ces argiles forment des "masses glissantes plus ou moins pâteuses" lorsqu'elles sont imbibées d'eau, l'infiltration se faisant à la faveur de lentilles sableuses ou graveleuses et de crevasses. De plus le torrent affouille constamment ses berges argileuses. On observe ainsi un ensemble de coulées contiguës au sein de la masse argileuse (en l'occurrence les coulées du Moulin et celle du Jalent). Les coulées ont la forme de langues plus ou moins bosselées (mais il n'y a pas formation de nombreux bourrelets réguliers). A la partie supérieure, il n'y a pas de vraie niche d'arrachement mais un ensemble de zones très crevassees en arc de cercle. Les coulées se sont répétées fréquemment au cours des âges : on situe les premières vers 1733, puis il y a remise en mouvement en 1888, 1936, 1940 suivant de très près, ce qui paraît normal, les crues du Brevon. Le processus de coulée est en plus activé par la pente des couches de la roche en place (marno-calcaires et schistes à pendage conforme), et par le Brevon entaillant la coulée.

III°, C 3-2-2 - Les coulées boueuses du type "mudflow".

Pendant longtemps, ce type de coulée a été considéré comme intermédiaire entre les glissements sensu stricto et les épanchages torrentiels. Une des premières descriptions est due à Mc GEE qui avait observé dans le Sud Ouest de l'Arizona, des coulées se présentant comme un "film épais de boue visqueuse glissant sur des pentes douces en formant des bourrelets". (1)

Puis d'autres en ont observés aux Indes dans l'Himalaya (M. CONWAY), dans les Alpes et les Montagnes Rocheuses (E. HOWE), dans les montagnes arides du Turkestan (W.R. RICKMERS). D'autres enfin, affirment que des "mudflows" peuvent accompagner des éruptions volcaniques dès que les cendres et poussières se sont saturées. (2) et (3)

Ceci explique la diversité des termes employés dans la littérature pour décrire ce phénomène : mud-rock flow (R.W. BAILEY & R.J. BECRAFT) ; mudspate (W.R. RICKMERS) ; mud-avalanche (W.M. CONWAY) ; mud-stream (T.G. BONNEY) ; sandbrei ou schlammstron dans la littérature allemande ; mure dans les Alpes orientales ; oplyvina en Russie ; lahar à Java ; huaico au Pérou ; swa dans l'Himalaya.

Les coulées de type mudflow se distinguent des autres par un certain nombre de caractères.

- le matériau est en général fin, de la taille des sables, des silts. Il peut être très poreux et emmagasiner ainsi de grosses quantités d'eau. Certains auteurs parlent d'un minimum de 50 % de particules fines pour qu'il y ait "mudflow".
- la teneur en eau est élevée ; les apports d'eau liquéfient le matériau pour lui donner l'aspect d'une lave.
- ce type de coulée suit toujours les formes du réseau hydrographiques existant et se trouve donc soumis à des apports d'eau considérables.
- le départ des matériaux n'est pas nettement localisé (pas de vraie niche d'arrachement), il se produit dans un bassin de réception plus ou moins important et a lieu sous forme d'affaissement de paquets se liquéfiant au contact de l'eau. Dès que la coulée atteint la vallée principale, elle s'évase en présentant l'aspect d'un cône de déjection.
- le mudflow est très rapide.

(1) - W.J. Mc GEE : "Sheetflood erosion" ; Bull. Geol. Soc. Am., vol. 8, 1897, p. 87-112.

Johannes WALTHER : "Das Gesetz der Wüstenbildung" ; 2d Ed., 1924, p. 191.

(2) - G.C. CURTIS : "secondary phenomena of the West Indian Volcanic Eruption of 1902". Journal of Geology, vol. II, p. 129-215, 1903.

(3) - Pompéi aurait été submergé par un mudflow lors de la grande éruption du Vésuve en 79 av. J.C.

- le mudflow peut être considéré comme un courant de grande densité. La masse semi-liquide est capable d'entraîner des blocs de plusieurs mètres de diamètre (compétence importante).

Lors d'études générales, on peut distinguer trois sortes de "mudflow".

a) Le "mudflow" de type alpin est le plus courant : l'alimentation en eau, intermittente venant de la fusion de la neige, plus l'apport des précipitations sont susceptibles de saturer rapidement des dépôts meubles qui se mettront en mouvement sur une pente même peu forte.

E. HOWE a rencontré dans le Colorado de tels écroulements. Le "mudflow" de Slumgullion représente l'écoulement d'un mélange de sable (provenant de l'altération ultime par des agents solfataris), de particules de gypse et de soufre natif. La coulée a couvert 7,8 km dans un ancien talweg avant de s'étaler dans la vallée principale, en formant le lac de San Cristobal (fig. 16).

Les coulées à répétition de Pontamafrey sont vraisemblablement du même type : le torrent de la Ravoire ramollissant et liquéfiant les matériaux des versants instables de son bassin de réception.

Ces "mudflows" transportent souvent de nombreux blocs. DICXON et BONNEY estiment que certains dépôts de blocs, dans les Alpes, sont en fait le résultat de "mudflows" post-glaciaires. (1)

b) Les "mudflows" semi-arides ; ils ont lieu dans des masses sableuses, graveleuses, contenant suffisamment de matériaux silteux, argileux, se saturant dans des délais courts. Les dimensions des grains vont de la taille d'un grain de poivre à celle d'une voiture, et sont la cause d'une porosité ouverte élevée. Les averses instantanées et violentes alliées à une couverture végétale peu dense et à une pente forte sont des facteurs importants dans la production de tels "mudflows" semi-arides.

c) Les "mudflows" volcaniques ; les débris volcaniques non consolidés se meuvent rapidement dès qu'il y a saturation. L'eau peut provenir soit de la pluie, soit de la fusion de neige, soit du volcan lui-même sous forme de vapeurs. En 1919, Java a été ravagée par de grands "mudflows" se rattachant à ce type.

III°, D - LA SOLIFLUXION. (2)

III°, D 1 - Avertissements.

Nous abordons avec la solifluxion et la reptation (creep), des notions assez floues, interprétées et définies de diverses manières suivant les auteurs. Nous n'aurons pas le loisir au cours de ce travail, de nous lancer dans une étude critique et détaillée de ces phénomènes (la bibliographie étant abondante et souvent très théorique). Nous tenons cependant à les mentionner dans notre schéma de classification, car ils représentent l'évolution fréquente voire obligatoire d'un versant. De plus, leurs actions quoique superficielles, peuvent être des plus préjudiciables pour l'homme. Une plate-forme routière, pour ne citer que cet exemple, résiste très mal aux sollicitations diverses que développe la solifluxion. Il nous suffit d'observer certaines de nos routes de montagnes, pour nous en rendre compte.

Pour plus de clarté, au cours de ces deux paragraphes, nous allons traiter ces mouvements superficiels dans leur ensemble : définition, classification, cause et mécanisme.

III°, D 2 - Définitions.

Le terme solifluxion est assez récent ; il a été employé, semble-t-il, pour la première fois, en 1906, par ANDERSSON pour définir "l'écoulement lent et superficiel d'une masse saturée" (l'eau provenant des précipitations

(1) - T.G. BONNEY : "Moraines and Mud-stream in the Alps", Geol. Mag., Decade 4, vol. 9, p. 8-16, 1902.

(2) - L'orthographe de ce mot resté à ce jour indéterminée. De nombreux auteurs comme J.P. WILLIAMS, C.F.S. SHARPE, ANDERSSON, E. PATTE, R. SOUCHEZ, emploient le terme solifluction en regard à la racine latine "fluctio" = s'écouler. D'autres tels TRICART, J.M. AVENARD utilisent l'orthographe solifluxion car "fluxio" dérive aussi de "fluo" et veut dire s'écouler en faisant intervenir l'image de bombement, "fluxion". Nous avons accepté cette deuxième interprétation comme telle, sans vouloir prendre pour autant une position absolue et nier la logique des partisans de la première étymologie.

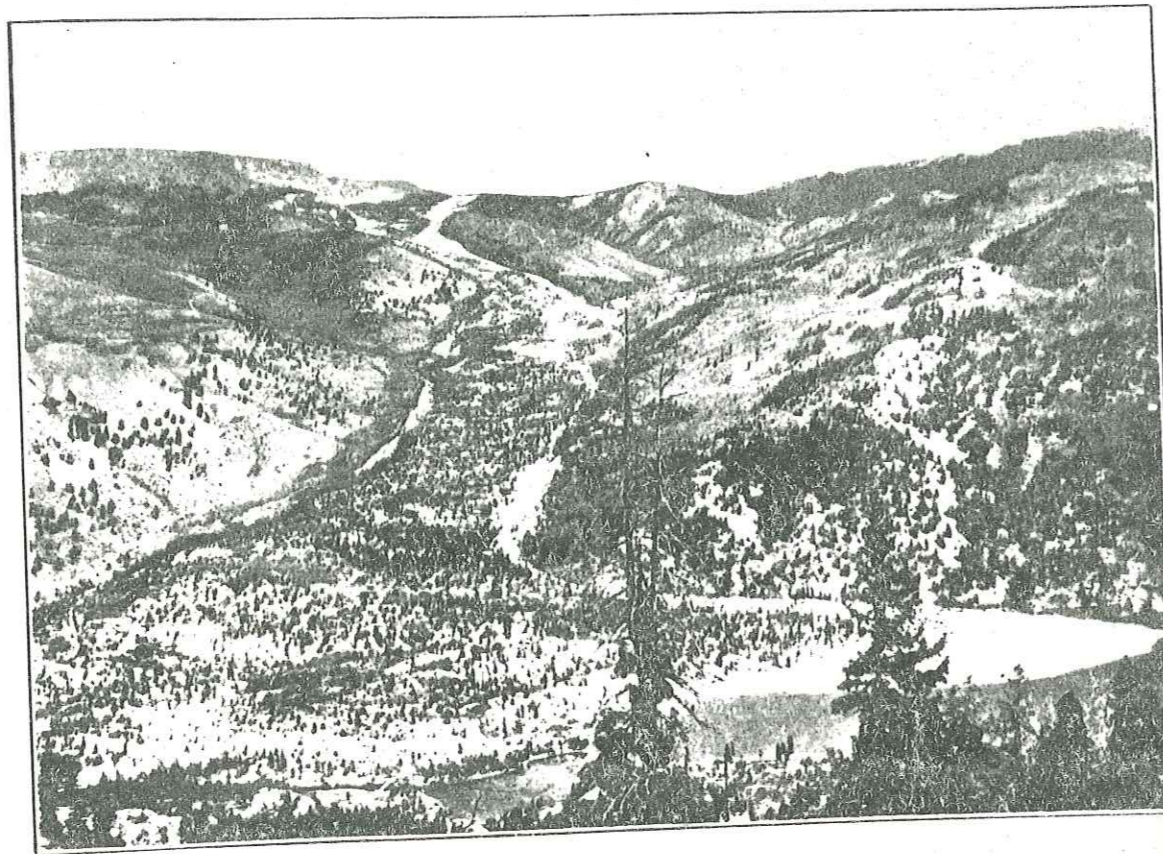


Fig. 16 - "Mudflow" de Slumgullion (Montagnes San Juan - U.S.A.) - Etalement important des matériaux sableux - Formation du lac San Cristobal (sur le côté droit de la photo) (Photo - E. HOWE).

atmosphériques, de la fusion de la neige ou du dégel du sol). Il ne la limite pas aux seules régions froides.

A sa suite de nombreux géologues, géomorphologues, pédologues scandinaves, américains ou russes décrivent la solifluxion comme un déplacement superficiel des matériaux rendus plus ou moins fluides au-dessus d'un sol gelé en profondeur : le Tjåle. Ce processus pouvait donc se classer pour eux parmi les formes de nivation.

Les pédologues et les préhistoriens, par contre, s'intéressent essentiellement aux conséquences de la solifluxion sur la structure des dépôts alluvionnaires. On lui attribue ainsi la genèse des sols polygonaux, des couches contournées, des coulées de pierres etc...

L'école française ne la considère plus seulement comme caractéristique des régions froides et des époques glaciaires ; elle groupe sous ce terme, un certain nombre de mouvements affectant les sols (débris d'altération, argile etc...), dès qu'ils sont suffisamment saturés. La solifluxion pourrait être considérée par la même occasion comme l'exagération des laves torrentielles, dans le temps et l'espace.

R. SOUCHEZ (1963) et J.M. AVENARD (1960), proposent des définitions plus théoriques établies sur les propriétés mécaniques des sols.

"Lorsqu'un manteau de débris contenant un pourcentage suffisant de particules fines inférieures à 10 microns, est saturé, il peut y avoir solifluxion sur une pente même faible".

Pour J.M. AVENARD, la solifluxion désigne "tous mouvements de sols en relation directe ou indirecte avec le franchissement des limites de plasticité et de liquidité".

Nous nous intéresserons donc ici à la solifluxion en tant que mouvement de terrain et nous proposerons la définition suivante établie par rapport à celle des glissements proprement dits et des coulées.

La solifluxion peut être considérée comme le mouvement lent, superficiel, plus ou moins continu et généralisé(1) de terrains meubles, renfermant une forte proportion de produits fins de la taille des limons et des argiles, (sous forme d'une déformation plastique) sur une pente même faible (on a décelé des mouvements sur des pentes de 5°). Il se déclenche dès que la teneur en eau dépasse les limites de plasticité et de liquidité du matériau, et ce, sous l'effet de l'eau de pluie, de fusion de neige ou de glace.

III°, D 3 - Classification.

On peut distinguer en premier lieu deux grands types de solifluxion.

- La solifluxion en pays froids.
- La solifluxion en pays tempérés.

III°, D 3-1 - La solifluxion en pays froids.

Elle est fréquente dans les régions à alternances prononcées de cycles gel - dégel, conditions climatiques sévissant dans les régions périglaciaires comme l'Alaska, la Scandinavie, ou encore dans les secteurs montagneux à enneigement de longue durée.

Dès la moindre pente, la surface topographique offre alors en général un paysage assez caractéristique de petites terrasses (2) se répétant à intervalle plus ou moins régulier (50 à 500 m), de bombements, de petites coulées. Ces formes sont souvent en relation soit avec le réseau hydrographique de surface, les lignes de drainage souterrain des eaux du dégel, les névés et plaques de neige. Dans ce dernier cas, à chaque placage de neige, correspond un bourrelet.

J.P. WILLIAMS a observé et étudié les bourrelets de pieds de névés sur les rives du fleuve Einovling près de Svaanagleget. Il s'agit d'un sol morainique comprenant une matrice argileuse, silteuse, des blocs, des lentilles de sable, supportant des névés dans une région à température moyenne annuelle de -0,9° C. Les mouvements de surface enregistrés ont atteint des maxima de 25 cm pour les mois de printemps 1956 et ceci jusqu'à une profondeur moyenne de 0,75 m.

(1) - Par rapport aux glissements ou aux coulées qui eux, sont des mouvements relativement localisés, la solifluxion comme d'ailleurs la reptation affectent en général de vastes étendues dont il est difficile de préciser les limites exactes entre zones stables et instables.

(2) - Ces terrasses sont appelées par certains auteurs "terrasses de solifluxion". D'autres réservent ce terme au bourrelet provoqué par la reptation.

En Alaska, la solifluxion de ce type a considérablement gêné la construction des routes.

III°, D 3-2 - La solifluxion en pays tempérés.

Nous n'excluons pas systématiquement le rôle que peuvent jouer les cycles gel - dégel et le manteau neigeux surtout dans nos régions de montagne, où ils sont responsables d'apports d'eau supplémentaires ; mais ces facteurs ne sont pas obligatoires.

L'eau météorique suivant le pourcentage d'infiltration suffit à provoquer la mise en mouvement superficielle de masses argileuses sous diverses formes. Si la perméabilité est suffisante, l'eau s'infiltré et imbibe petit à petit la masse toute entière. Si la teneur en eau est inférieure aux limites de liquidité et de plasticité, le versant reste théoriquement stable. Une élévation de la teneur en eau amenant un franchissement des limites, provoquera des déformations. Nous pouvons donc différencier plusieurs types de solifluxion suivant l'action de la teneur en eau, l'existence de plans de glissement, le caractère localisé ou généralisé du mouvement.

III°, D 3-2-1 - La solifluxion avec bombement ou ondulation.

La surface d'un versant soumis à ce type de solifluxion laisse apparaître des séries de bombements plus ou moins évasés et de légers creux, couvrant en général de grandes superficies. Les arbres sont recourbés et témoignent d'un lent mouvement du terrain permettant cependant à la végétation de s'adapter. Ces formes sont fréquentes dans les argiles morainiques, les molasses sableuses argileuses.

A la limite, ces formes pourraient se classer dans la reptation ; mais les causes de mouvements sont sensiblement différentes. Les infiltrations d'eau permettent le franchissement de la limite de plasticité seule, entraînant ainsi un remaniement à l'état pâteux et une déformation plastique lente. Le résultat est ce que AVENARD appelle un versant à "amples ondulations".

Si l'eau se concentre en quantités plus importantes, la limite de liquidité peut être franchie localement et momentanément ; des étirements et des bombements de plus grande amplitude se produisent. Ce sont les "boursoflures" classiques des terrains à dominante argileuse. Par rapport aux "amples ondulations" plus discrètes, ces formes (1) sont nettement marquées dans la topographie ; leurs dimensions (notamment la hauteur du bourrelet) sont plus importantes. Les boursoflures sont disposées dans le versant de façon très désordonnée.

La solifluxion affecte aussi souvent les terrains tendres supportant des masses de roches dures et pesantes. Les marnes supportant des corniches calcaires par exemple ont tendance à se déformer sous l'action de l'eau et de la pression. Il se forme, en pied de falaise, des bourrelets de dimensions variables. Les mouvements n'affectent pas obligatoirement tout le versant marneux ou argileux, ils se cantonnent souvent dans le secteur de pied de falaise ou de cuesta (voir figure 17). TRICART et AVENARD ont observé de tels phénomènes en Lorraine. Ce type de solifluxion peut contribuer au déclenchement d'écroulement ou évoluer en glissement de blocs. La méconnaissance de tels phénomènes peut être néfaste. Il est en effet dangereux de construire des routes dans de tels sites. L'autoroute contournant Nancy, construit juste au pied de la corniche calcaire bajocienne aalénienne, à l'endroit où les marnes toarciennes "foirent", emportant avec elles des paquets d'Aalénien, passe ainsi dans la partie de versant la plus affectée par les mouvements, d'où les répercussions sur les accotements, les caniveaux et même la chaussée.

III°, D 3-2-2 - La solifluxion avec "déchirure" et "griffure".

Ce type présente des formes plus localisées et plus diverses. Leur aspect est d'ailleurs beaucoup plus spectaculaire, car elles s'accompagnent de déchirements et de décollements bouleversant entièrement la topographie. Sur un versant peuvent donc apparaître des "griffures", des "déchirures", des "coups de cuillère" dont la partie supérieure est généralement en arc de cercle (voir figure 18). Ceci est fréquent dans les matériaux peu plastiques, il y a cassure brutale alors que dans le cas de sols très plastiques il n'y a que bombement. A partir de ces griffures, le matériau saturé peut s'écouler et former de petites coulées boueuses peu épaisses rappelant ainsi à une échelle réduite le mécanisme du slump-earthflow.

III°, D 3-2-3 - La solifluxion à "décollements".

Nous avons affaire ici à un type de solifluxion localisée. Si des modifications dans les conditions naturelles d'équilibre interviennent brutalement (sapement par rivière en crue, travaux humains modifiant la pente naturelle)

(1) - Certains auteurs parlent de "loupes de solifluxion".

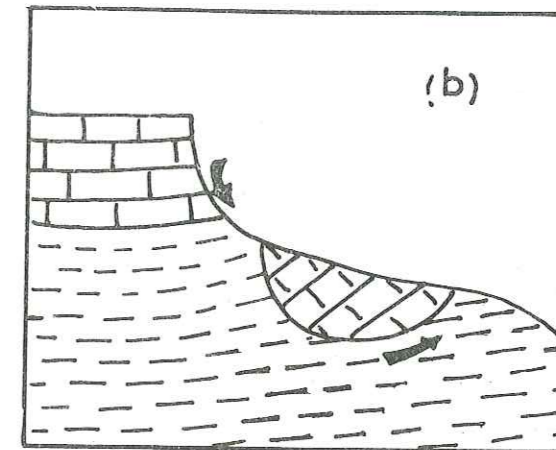
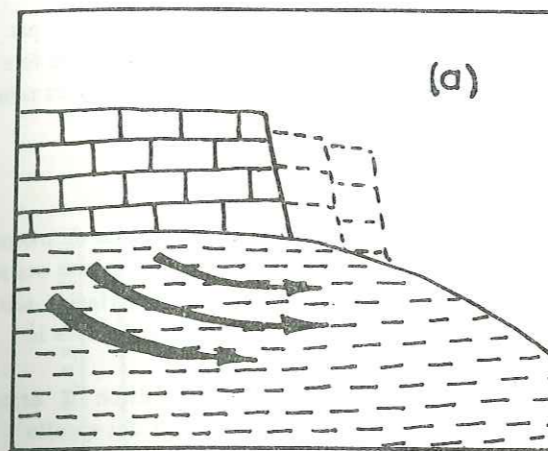


Fig.17a-b Solifluxion avec bombement, cas particulier de la cuesta calcaire sur marnes.

(a) Corniche estompée : paquets de calcaire masquant le front de cote, pente convexe des marnes.

(b) Mouvement d'un paquet calcaire.

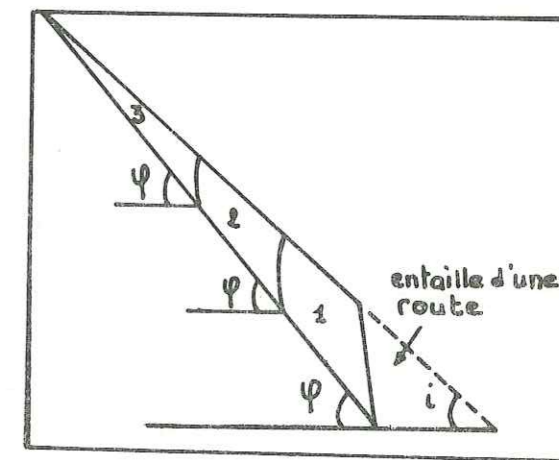
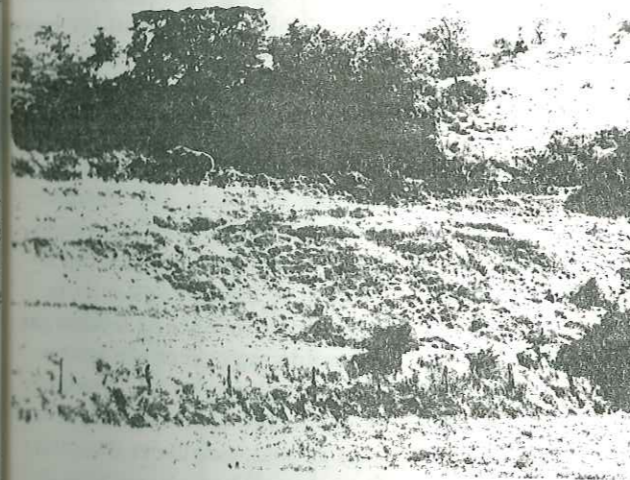


Fig.18 Solifluxion à griffures et déchirures.

Fig.19. Décollement par paquets successifs

d'un talus) l'équilibre peut être rompu. Des mouvements lents se déclenchent, soit de manière brutale, soit par saccades. Il se produit alors des décollements de plaques ou de paquets de sols. Dans ce type l'eau joue une fois de plus, un grand rôle. Ces décollements peuvent prendre des formes diverses depuis l'affaissement commun au talus amont des routes jusqu'au décollement par paquets successifs (voir figure 19).

III°, D 4 - Causes et mécanismes de la solifluxion.

Le mécanisme théorique de la solifluxion peut se résumer comme suit. Un manteau de débris plus ou moins incliné, soumis à des pressions, subit des déformations. Dès que la contrainte de cisaillement a atteint une certaine valeur limite, la déformation devient permanente et peut, soit se produire suivant une ou plusieurs surfaces, soit intéresser toute la masse. Le premier cas représente une rupture et on parle de "reptation de rupture" ; dans le deuxième cas il s'agit de solifluxion.

Si le manteau de débris contient suffisamment de particules fines (inf. à 10 microns), la cohésion c , étant importante, il n'y a pas de déplacement de matériaux tant que la teneur en eau reste faible. Mais dès qu'elle s'élève la théorie de la plasticité peut s'appliquer.

Il existe une épaisseur donnée du manteau de débris à partir de laquelle le déplacement se produit sur une pente donnée. Ce déplacement peut avoir lieu soit dans un état actif de Rankine soit dans un état passif (une zone convexe favorisera un écoulement actif, une zone concave un écoulement passif).

a) La solifluxion dépend donc en grande partie de la teneur en eau du manteau de débris, susceptible de dépasser les limites de plasticité et de liquidité du sol, processus conditionné par la perméabilité et l'indice de vide.

- La teneur en eau peut franchir la limite de plasticité, il y a alors déformation plastique se traduisant par des "bombements" des "boursofflures" etc... L'intensité et la profondeur du mouvement seront conditionnées par la perméabilité, l'importance des apports d'eau, la pente. Un sol argileux à limite de plasticité très basse sera donc susceptible de solifluer facilement même avec des perméabilités très faibles. La fissuration superficielle des argiles après une période de sécheresse accroît la perméabilité secondaire de la masse, permettant ainsi une imbibition plus importante et plus constante. C'est le cas vraisemblablement des mouvements de surface de Léaz où l'eau s'infiltrerait relativement facilement faisant jouer ainsi les variables par rapport aux autres. La limite de plasticité doit être franchie assez souvent et longtemps pour que les bombements apparaissent. Nous avons consigné dans un tableau les caractéristiques de quelques formations affectées par la solifluxion et illustrant ce processus (voir tableau n° 10).

- Infiltration et franchissement de la limite de liquidité et de plasticité. Si le pourcentage de vide permet une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité et si les apports d'eau sont suffisants, des "boursofflures" apparaissent. Il y a d'abord un début de concentration en eau souvent à la faveur d'un substratum peu profond ou d'une zone moins perméable, des bombements font alors leur apparition. Profitant des irrégularités de terrain, l'eau imbibe plus fortement certaines régions provoquant le franchissement de la limite de liquidité et le sol "s'écoule". La couche de surface est passive car moins imbibée et retenue par les racines, elle suit le mouvement de la partie interne à quelques décimètres de profondeur. En arrière du bourrelet il y a étirement et distension des matériaux qui à leur tour viennent alimenter les "boursofflures". Cet étirement a, en général, pour premier effet d'aérer le sol ce qui accroît ainsi la perméabilité et permet à l'eau de s'écouler relativement facilement sans créer de poches de sous-pression et d'humidifier le versant plus bas. Il y a ainsi déformation continue et progressive gagnant peu à peu l'ensemble du versant. Le phénomène d'aération du sol explique pourquoi une boursofflure n'évolue pas forcément en déchirure et coulée ; la partie supérieure du bourrelet n'est plus imbibée que partiellement et pendant un temps assez court. Si ce bourrelet crève, il apparaît alors une source dans la déchirure favorisant ainsi l'action de l'érosion régressive. De tels mouvements sont fréquents sur les bords de la R.N. 85 Grenoble Gap et notamment dans la région de Corps.

J.M. AVENARD a pu vérifier ce mécanisme sur certains sites dont nous avons résumé les caractéristiques dans le tableau n° 11.

- Concentration de l'eau et franchissement de la limite de liquidité. Au contact de l'eau circulant en profondeur ou dans des secteurs très localisés et saturés, la limite de liquidité peut être franchie. Ce processus engendre donc soit des "boursofflures" soit des "griffures" ou "arrachements". Les données d'observation

*Eventail "soufflage" par l'effet de la pression de courant
cf. Duffaut et Louis, XIII, Montécat, 1972.*

TABEAU N° 10 - SOLIFLUXION AVEC FRANCHISSEMENT DE LA LIMITE DE PLASTICITE.

LOCALISATION	NATURE	DENSITE en g/ cm ³	TENEUR en eau à la prise	L.L.	L.P.	K.	REMARQUES
Pont de POITTE (Jura), route d'Orcelet. JMA	Argile varvée	1,25	25,7 %	38,6 %	23 %	0,012 cm/s	pluie fine
YVERDON route n° 5 Suisse. JMA	Molasse sablo-argileuse	1,22	37,5 %	48,5 %	37,3 %	1,4 cm/s	échantillon surface
Pont de CAILLE Route N° 201, 2 km au Sud de CRUSEILLE. JMA	Moraine argileuse	1,66	13,5 %	28,0 %	16,1 %	0,0012 cm/s	échantillon surface pas de pluies avant prise de l'échantillon.
LEAZ (Ain) secteur de la "Combe" JP8	Argile varvée	2,08	25,0 %	46,0 %	19,7 %	10 ⁻⁸ m/s	échantillon Mazier à 3,60 m de la surface
LEAZ (Ain) R.N. 84 P et C	Argile varvée	1,77	21,0 %	32,0 %	14,0 %		échantillon sondage.
Route près de TOUL JMA.	Argovien sur Oxfordien		29,5 %	48,8 %	28,0 %		échantillon surface

L.L. = limite de liquidité - L.P. = limite de plasticité - K. = perméabilité.

TABEAU N° 11 - SOLIFLUXION AVEC FRANCHISSEMENT DES LIMITES DE LIQUIDITE ET DE PLASTICITE.

LOCALISATION	NATURE du MATERIAU	% VIDES	DENSITE SECHE en g/cm ³	TENEUR EN EAU	L.L.	L.P.	K.	REMARQUES
Sortie nord de BALSTHAL sur route de Bâle.	moraines argileuses pente : 20°	56,8 %	0,95	56,5 %	54,8 %	45,2 %		Pluies violentes avant prise.
Hameau de CROTTE R. N. 94 en amont du barrage de Serre-Ponçon.	moraine sur schistes	50,4 %	1,12	39,9 %	38,8 %	30,0 %	0,58 cm/s pour moraine	temps sec depuis plusieurs jours avant la prise
LAUCHETTE, 200 m en amont du croisement V.I. et R.N. 100	lambeaux de moraine sur schistes	67,7 %	0,80	55,4 %	53,2 %	42,7 %	0,44 cm/s	pas de pluies dégel terminé au moment prise, nombreuses sources.
Col du HERRENBERG près du Honeck	arène granitique	62,1 %	0,92	57,2 %	47,0 %	-	0,437 cm/s	eau abondante
Chaume de CHITELET au pied du Honeck	arène granitique	63,7 %	0,78	81,1 %	47,8 %	-	0,9173 cm/s	eau abondante

L.L. = Limite de liquidité - L.P. = Limite de plasticité - K. = Perméabilité (in J.M. AVENARD : "La solifluxion" C.D.U. 1962).

permettent de distinguer un mode d'action de l'eau différent.

Dans le cas des "boursofflures", l'eau ne se concentre pas, elle se répand dans une partie de terrain à la fois. Son action est relativement limitée dans le temps, la limite de liquidité n'est donc pas atteinte très longtemps. Pour les "griffures" il y a concentration très localisée de l'eau dans des poches souvent au débouché de sources. Des petits mouvements obstruant la sortie de ces sources force l'eau à imbiber fortement le terrain (d'où franchissement de la L.L.), des sous-pressions se créent, le bouchon se ramollit et à un moment donné il saute. Si le sol est peu plastique il y a cassure brutale. Si le sol perméable repose sur un substratum moins perméable profond ou non, la L.L. sera franchie sur cette surface de contact.

b) Dans les régions froides ou de hautes altitudes, un apport d'eau important est dû à la fusion de la neige ou au dégel plus ou moins brutal. Dans les pays scandinaves, les alternances gel - dégel jouent un grand rôle dans le premier mètre sous la surface du sol. Outre son action gonflante, le gel contribue à augmenter l'indice de vide d'où une répercussion immédiate sur la perméabilité (1); au dégel donc, la teneur en eau va pouvoir s'accroître elle aussi dans de fortes proportions et il y aura libération d'eau à l'intérieur du versant à une vitesse suffisante pour mettre en mouvement les grains du sol (effet d'entraînement).

c) La pente joue aussi un rôle non négligeable, notamment pour les types de solifluxion par décollement. L'équilibre des talus taillés artificiellement ou naturellement est en effet soumis aux conditions de la loi de Coulomb :

$$S = C + N \operatorname{tg} \varphi$$

où S = la contrainte tangentielle
N = la contrainte normale
 φ = l'angle de frottement interne
C = la cohésion.

La contrainte tangentielle est fonction de l'angle que fait la surface du talus avec l'horizontale. Ainsi pour une cohésion donnée il y aura équilibre instable si sa pente est supérieure à l'angle de frottement interne.

III°, E - LA REPTATION (CREEP, CREEPING).

III°, E 1 - Introduction et définitions

Ce terme est souvent employé dans la littérature pour désigner au moins deux phénomènes naturels différents qu'il importe de différencier au départ.

Certains auteurs l'emploient pour désigner les mouvements lents précédant la rupture finale provoquant le slump, le glissement de roches etc...

D'autres considèrent la reptation comme un type particulier de mouvement de terrain lent et superficiel. Nous utiliserons ce terme dans ce sens, ce qui justifie un groupe à part dans la classification.

La reptation peut être considérée comme un transport gravitaire de sol ou de débris de roches sur une pente donnée, se traduisant par des mouvements superficiels, lents, en général imperceptibles à l'œil.

III°, E 2 - Caractéristiques de la reptation.

a) La reptation est un phénomène superficiel et affecte en général l'ensemble d'un versant. Elle se traduit en surface par des ondulations peu marquées sans griffures ni déchirures à proprement parler. L'existence d'un tel mouvement se distingue surtout par l'allure penchée des objets rigides verticaux disséminés dans la pente : arbres, poteaux, clôtures etc... Dans les pays froids, le gonflement dû au gel accuse beaucoup plus les ondulations qui prennent souvent la forme de petites terrasses étroites.

b) Elle affecte surtout les manteaux de débris ne contenant pas trop de particules inférieures à 10 microns.

(1) - TAYLOR (1948), cite l'exemple d'une perméabilité 10 fois plus forte à la suite d'une augmentation de l'indice de vide de 15 %.

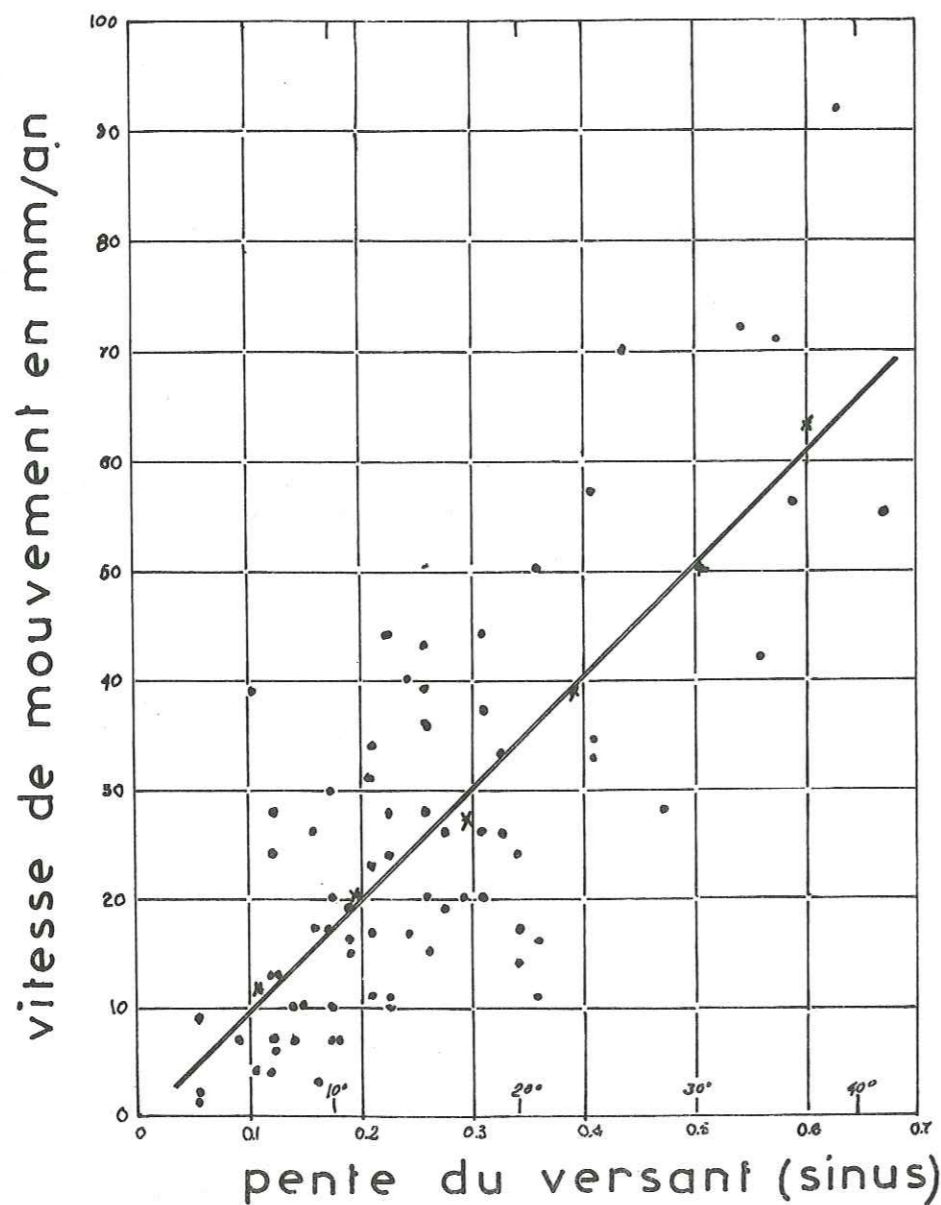


fig. 20 Relation entre la pente du versant et la vitesse de mouvement dans des débris de schiste : formation de Mancos (Colorado) d'après S.A SCHUMM

c) La déformation se fait de proche en proche et de façon continue. Toutefois les variations climatiques saisonnières contribuent à augmenter la vitesse de déplacement ce qui a amené certains auteurs à parler de reptation saisonnière (seasonal creep) rapport à une reptation continue (continuous creep).

d) La vitesse de déplacement est généralement inférieure à un pied par an (1 pied = 0,30 m). La vitesse moyenne de reptation d'après différents auteurs varie surtout en fonction des zones climatiques, de la pente du manteau de débris, de celle du substratum.

LOCALISATION	AUTEURS	PENTE S	VITESSES
Groenland	WASHBURN 1962	34 %	6 cm/an
Scandinavie (éboulis)	RAPP 1960	82 %	10 cm/an
Alaska	SIGAFOOS et HOPKINS	-	5 cm à 30 cm/an
Angleterre (sols argileux) (avec végétation)	YOUNG	66 %	0,012 cm/an
Ouest Colorado (schistes)	SCHUMM	34 %	1,8 cm/an
		82 %	11 cm/an
		66 %	6 cm/an

S.A. SCHUMM a surveillé pendant 7 ans l'évolution d'un versant constitué des schistes Mancos du Crétacé supérieur du Colorado ouest et en déduit que dans 59 % des cas, les variations de vitesses sont fonction de la pente seule. Il a pu établir une relation empirique $V = 100 S - 0,7$ ou $V = 100 S$, signifiant que la vitesse de reptation pour les schistes de Mancos est directement proportionnelle au sinus de la pente du versant (voir figure 20).

III°, E 3 - Mécanismes.

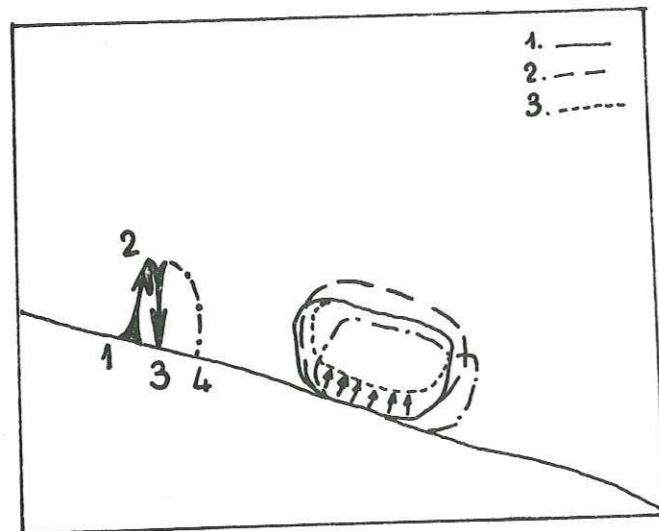
Le polonais A. JAHN en 1954 (1), dans un article sur la "balance de dénudation" ou "bilan morphogénétique du versant" ramène les forces s'exerçant sur un versant à une composante parallèle (pesanteur) et une composante perpendiculaire (altération, météorisation). La composante perpendiculaire à la surface du sol transforme sur place la roche mère en fournissant ainsi des matériaux meubles. La composante parallèle joue le rôle de transport en contribuant à entraîner ces débris sous l'action de la pesanteur, sous la forme d'éboulis, de ruissellement, de solifluxion, de reptation en particulier.

La reptation représente donc pour les géomorphologues un facteur important de l'évolution d'un versant aboutissant aux diverses formes de profil que l'on peut observer dans la nature. Le mécanisme est régi par la pesanteur dont l'action est en outre facilitée par divers autres facteurs que nous avons déjà eu l'occasion d'évoquer pour les autres types de mouvement. Parmi ceux-ci le processus contraction - expansion dû aux variations de teneur en eau et notamment de température, joue un rôle primordial. C.F.S. SHARPE a d'ailleurs élaboré une classification de la reptation à partir de données climatiques (2). Les cycles expansion - contraction sont liés à trois types de fluctuations :

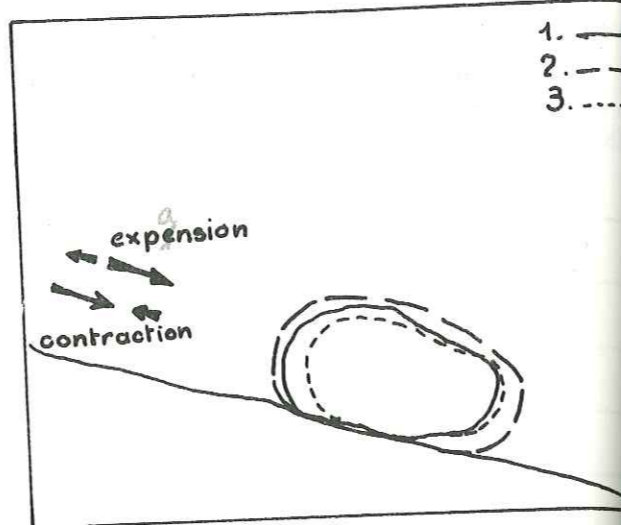
- les fluctuations thermiques.
- les alternances gel dégel.
- les variations hydriques.

(1) - A. JAHN : "Balance de dénudation du versant" Czasopismo Geogr. XXV, 1954.

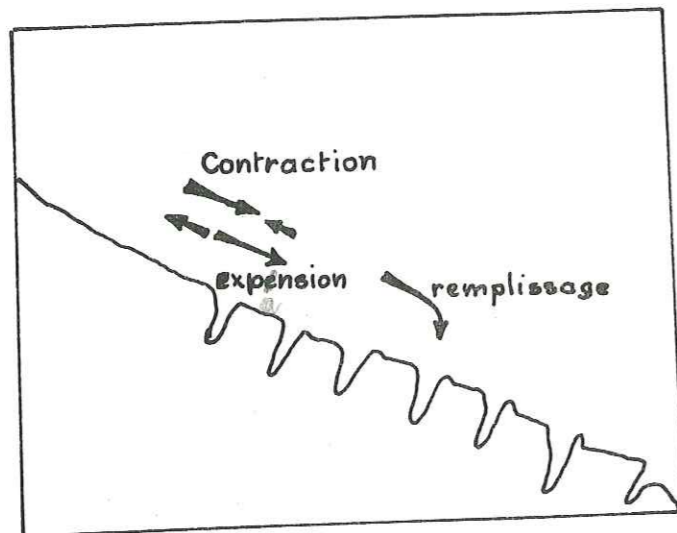
(2) - Reptation en pays tempéré et aride. - Reptation en pays froid (périglaciaire).



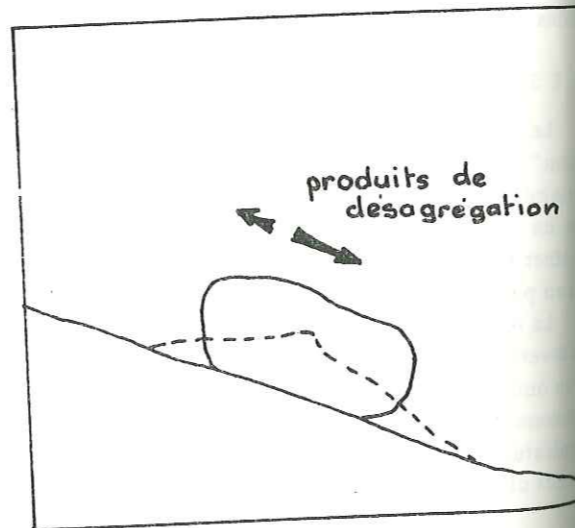
Gel et dégel
fig. 21a



Variation de température
fig. 21b



Dessication et
Absorption
fig. 21c



Désagrégation
fig. 22

Les deux premiers sont les plus importants. Les alternances de périodes chaudes et froides ont tendance à soumettre les débris à des concentrations importantes en provenance du haut du versant et une expansion vers le bas (voir figures 21 a-b-c et 22) provoquant ainsi des mouvements élémentaires grain à grain. Elles sont aussi responsables de fissures et crevasses de dessication et des variations d'humidité entre les grains. Le gel est indubitablement l'un des agents les plus actifs ; nous avons vu d'ailleurs qu'il contribuait à accroître la vitesse de mouvement. Il se manifeste par son action gonflante, par le pouvoir d'expansion de la glace. Des observations faites sur le terrain ont montré que lorsqu'une lentille de glace commence à fondre elle tend à le faire par sa base. Les grains de sol ne sont plus supportés tombent et glissent ou roulent vers le bas du versant. Ce facteur n'est toutefois pas obligatoire en pays tempéré et chaud, la saturation du matériau à la suite de grosses pluies est susceptible de causer des mouvements soudains. La désagrégation ou la décomposition chimique provoque aussi un étalement des débris fins qui auront tendance par la suite à s'écouler.

III, F - CONCLUSIONS

En conclusion, la classification synthétique proposée peut se ranger parmi les classifications descriptives ce qui explique le nombre de subdivisions différentes. Les critères descriptifs semblent en effet les plus commodes et les plus simples à employer notamment dans le cadre d'étude statistique régionale. Toutefois, en ne considérant que le seul aspect mécanique des mouvements, il est possible d'opérer des regroupements soit selon le critère de présence ou d'absence d'une surface de faiblesse, soit en fonction de la forme générale de cette surface : mouvement selon une surface "circulaire" ou mouvement selon une surface parallèle à des plans structuraux (faille - plans de stratification - surface topographique etc...), cette dernière étant en général plane.

CHAPITRE 2

LES FACTEURS D'INSTABILITE.

- I° - PESANTEUR
- II° - GEOMETRIE EXTERNE
- III° - GEOMETRIE INTERNE
- IV° - NATURE DES MATERIAUX
- V° - CIRCULATION D'EAU
- VI° - FACTEURS CLIMATIQUES
- VII° - VEGETATION
- VIII° - SUPPRESSION DE SUPPORT
- IX° - VIBRATIONS
- X° - SURCHARGES
- XI° - CONCLUSIONS - MECANISME GENERAL.

INTRODUCTION.

Le déclenchement d'un glissement est dû le plus souvent à un ensemble de facteurs les plus divers agissant de concert et dont il est difficile, en première approximation, de différencier la part de responsabilité propre dans la rupture. Différents auteurs comme HOWE, TERZAGHI, SHARPE, BENDEL, LADD classent les causes de glissements en deux grands types :

- les causes internes, provoquant une diminution de la résistance au cisaillement ;
 - les causes externes, provoquant une augmentation de la contrainte de cisaillement ;
- ou soit encore :
- les causes naturelles ;
 - les causes artificielles.

Pour pallier l'ambiguïté des termes et les confusions possibles, nous distinguerons deux sortes de causes ou paramètres d'instabilité.

- l'ensemble des facteurs créant un climat favorable au glissement, ou constantes à évolution lente, ou causes lointaines, qu'elles soient naturelles ou artificielles.
- les causes finales, ou variations rapides dans les propriétés et la géométrie d'un sol et d'un versant donné.

Nous examinerons en premier lieu, sans souci de classification précise les différents facteurs d'instabilité, ainsi qu'une image approximative des mécanismes. Puis à l'aide de tableau nous les grouperons suivant le schéma défini ci-dessus et nous les replacerons d'une façon synthétique dans la classification générale des mouvements de terrain.

Nous retiendrons les principaux facteurs suivants :

- La pesanteur
- La géométrie externe (topographie, morphologie) avec les paramètres
 - + Exposition
 - + Pente du versant.
- La géométrie interne (lithologie, stratigraphie, tectonique)
 - + La forme et la disposition des volumes.
 - + Les discontinuités affectant ces volumes.
- La nature des matériaux aussi bien minéralogique que chimique et mécanique, ainsi que l'arrangement des grains.
- Les circulations d'eau.
- Le climat.
- La végétation.
- La suppression de support.
- Les vibrations.
- Les phénomènes de surcharge.

I° - LA PESANTEUR.

Elle constitue un des seuls facteurs permanents d'instabilité. Son action s'exerce à des degrés divers sur tous les types de mouvements de terrain depuis l'éroulement jusqu'à la reptation. Son influence étant évidente, nous ne nous attarderons pas sur ce sujet.

II° - FACTEURS GEOMETRIQUES EXTERNES.

Nous entendons par le terme de géométrie externe un certain nombre de données topographiques et morphologiques caractérisant un versant, à savoir : les formes générales et de détail, l'exposition, la pente. Parmi celles-ci les deux dernières peuvent jouer un rôle important dans le déclenchement des glissements.

II°, 1 - L'exposition du versant.

Ce paramètre est considéré comme mineur en raison d'influences annexes plus importantes qui lui sont liées telles : la végétation et ses relations avec le ruissellement. Il est cependant intéressant de constater suivant les régions une certaine répartition des glissements en fonction de l'exposition. Chester B. BEATY (1936) a réalisé une courte étude statistique (112 glissements observés) dans les collines de Berkeley à l'Est de la baie de San Francisco la distribution était la suivante :

Versants exposés au Nord Ouest	= 30
" " au Nord Est	= 24
" " au Sud Ouest	= 15
" " au Nord	= 14
" " à l'Est	= 10
" " au Sud Est	= 10
" " au Sud	= 5
" " à l'Ouest	= 4

70 % des glissements ont donc lieu sur des pentes exposées au Nord Ouest - Nord Est - Nord - Est, moins ensoleillées surtout en hiver, et se trouvant dans les conditions d'humidité maximum coïncidant avec une accumulation de matériaux désagrégés.

Dans certains secteurs des Alpes, il semble que les glissements se soient concentrés sur les pentes exposées au Sud. C. KERCKHOVE a fait de telles constatations dans la vallée de l'Ubaye dont le versant sud a conservé l'empreinte de nombreux glissements anciens (post-glaciaires ou interstadières) importants comme le glissement de Jansier par exemple. La vallée de l'Arc est soumise en partie au même phénomène, entre St-Jean-de-Maurienne et Lanslebourg. Indépendamment de la nature des terrains et de la fracturation, on peut penser que la fusion rapide de la glace et de la neige a pu provoquer une libération d'eau et une suppression de support brutales. De plus, une progression rapide des langues glaciaires affluentes suspendues dans le versant ensoleillé, entraîne des surplombs ; des glaciers "pendants", puis des avalanches susceptibles de surcharger le terrain. Il serait intéressant de pouvoir faire des observations similaires sur les régions situées à haute altitude ou soumises à des climats de type périglaciaire.

Par contre en Italie, le long de "l'autoroute du Soleil", les inconvénients ^{vient} ~~venaient~~ des versants nord où le pourcentage des matériaux argileux serait plus important du fait d'une saturation prolongée durant les périodes glaciaires.

Ce paramètre doit cependant, en l'absence d'étude statistique très poussée, être pris encore en valeur relative et plus, comme une indication à caractère préventif, que comme une cause propre des mouvements de terrain, qui sont soumis à d'autres facteurs plus déterminants.

II°, 2 - La pente.

Une des conditions latentes et déterminantes des glissements réside dans la pente des talus. Une étude statistique américaine portant sur les versants de la rivière Columbia, et plus précisément sur les berges de la retenue du barrage Franklin Roosevelt, démontre que la pente moyenne du versant est hautement significative d'après les divers tests de probabilité et de confiance (1). Des calculs ont été faits et conduisent à l'élaboration d'abaques théoriques reliant l'angle de frottement interne, la cohésion, la densité, l'angle de talus et sa hauteur. Ainsi pour un sol

(1) - Les facteurs d'incertitudes liés à des méthodes de mesure différentes et à des observateurs différents ne sont pas significatifs.

TABEAU N° 12 - VALEURS DE PENTE POUR QUELQUES GLISSEMENTS

LOCALISATION	AGE	TYPE	VOLUME en millions de m ³	PENTE	REMARQUES
Poschiavosee Motta di Meshino (Italie)	Post-glaciaire	coulée	150	19°	
Bormio (Italie)	Post-glaciaire	coulée	180	20°	type de matériaux = dolomies
Disentis (Suisse)	29/6/1683	coulée	50	21°	Schistes cristallins
Diablerets (Suisse)	24/9/1714		50		
Val de Menton (France)	26/4/1952	coulées superficielles	-	40 à 50°	Pente du versant
Bekkelaget (Norvège)	7/10/1953	étalement soudain	-	5 à 6°	Argile sensible
Le Chatelard (Haute-Savoie)	12-15/3/31	coulée	0,3	16°	Pente moyenne de la coulée
Le Jalent (Haute-Savoie)		coulée		5°	Pente moyenne de la coulée
Beskyden CSR		glissement de roches	0,02	48°	pente de la stratification
D 14 au Nord de Meyssac	Oct. 1960	Décollement de plaques	-	35°	pente du talus
Meyronnes (Ubayette)		coulées solifluxion	-	30°	pente moyenne du versant
R. N. 85 Chateau-Arnoux (Basses-Alpes)		solifluxion en paquets	-	33° à 35°	pente du talus en conglomérats.

TABLEAU N° 13 - PENTES DE LA SURFACE TOPOGRAPHIQUE EN RELATION AVEC LA PENTE DES COUCHES DANS LE CONDROZ (BELGIQUE)

Nature du Substratum	Inclinaison des Couches	Disposition du Versant	Nombre de Profils	Pente moyenne de chaque profil		Pente moyenne de chaque profil	
				Valeurs extrêmes	Moyennes	Valeurs extrêmes	Moyennes
CALCAIRES	30 à 50°	conformes	5	4,3 - 10,3 %	7,4 %	9,0 - 23,0 %	16,4 %
		inverses	7	4,6 - 11,2 %	8,4 %	12,5 - 26,0 %	20,1 %
	50 à 60°	conformes	6	5,4 - 11,6 %	8,0 %	15,0 - 46,0 %	30,0 %
		inverses	8	6,6 - 11,5 %	9,2 %	17,0 - 47,5 %	26,0 %
PSAMMITES	65 à 80°	conformes	5	6,0 - 11,6 %	8,6 %	12,0 - 46,5 %	24,0 %
		inverses	7	7,5 - 12,5 %	9,0 %	16,0 - 26,5 %	22,7 %
CALCAIRES surmontés de PSAMMITES	50 à 65°	conformes	12	7,0 - 19,5 %	9,9 %	20,0 - 35,0 %	24,8 %
		inverses	3	9,5 - 15,0 %	11,8 %	22,0 - 39,0 %	30,9 %
	non différenciée	conformes	16	4,4 - 19,5 %	9,3 %	8,0 - 47,0 %	22,0 %
		inverses	5	6,0 - 10,0 %	8,5 %	21,0 - 35,0 %	25,0 %

(in P. MACCAR et J. LAMBERT - Annales de géomorphologie supplément 1 - p. 130 - 1960).

cohésion $C = 0$, la pente du talus ne doit pas dépasser la valeur de l'angle de frottement interne, φ . Si $\varphi = 0$, on ne peut dépasser une certaine hauteur $H = (\pi + 2) \frac{C}{\gamma}$. S'il y a percolation d'eau on n'excédera pas une valeur donnée de la pente de talus $\beta = \frac{\varphi}{2}$.

La pente favorise :

- l'action de la pesanteur notamment dans le cas d'écroulement, de glissement de roches, de blocs, de coulées. Mis à part l'écroulement qui requiert une pente forte (supérieure à 50°), les autres types ont lieu sur des pentes modérées, même faibles parfois (voir tableau n° 12).
- le ruissellement ou l'infiltration ; une pente forte favorise un ruissellement intense, rapide, l'emportant sur l'infiltration ; donc il y a risques d'érosion forte et d'affouillement. Une pente faible permet une infiltration plus importante selon bien entendu la perméabilité du terrain.

L'influence de la pente sur la stabilité est étroitement liée à d'autres paramètres tels que :

- la hauteur du versant.
- la lithologie, la forme des grains, leur poids.
- la pente des couches ; P. MACCAR et J. LAMBERT (1960), au cours d'une étude dans le Condroz (Belgique), sur les relations entre pentes de couches et pentes des versants (voir tableau n° 13), mettent en évidence que la pente moyenne des versants conformes est généralement inférieure à celle des versants inverses et que les valeurs de la pente topographique augmentent régulièrement avec l'inclinaison des couches.
- la présence et l'importance des cours d'eau érodant le pied de talus.

J.N. HUTCHINSON (1967), a étudié la libre dégradation des falaises d'argile par glissements dans l'Essex et le Kent, et comparé les valeurs des pentes instables sur la côte à celles des régions de l'intérieur suivant une classification morphologique particulière (voir figure 23).

- "Slump" peu profond dans les falaises protégées par accumulations de débris à leurs pieds (defended cliff) : (R.).
- "Slump" successif ou en marche d'escalier (S), dans les falaises abandonnées ou mortes.
- Ondulations (U) dans les falaises mortes.
- Glissement peu profond, peu marqué, à mouvement mixte : début de rotation et translation, dans les talus de l'intérieur (N).
- Glissement à mouvement de translation dominant (L).

Les observations portant sur des glissements anciens, survenus à la fin de l'érosion marine, et sur des glissements récents, lui ont permis de définir la pente ultime de stabilité qui est de 8°. Pour les talus de l'intérieur cette pente limite peut aller jusqu'à 10° (voir figure 24), la différence de 2° serait due, en partie, aux variations de niveaux maxima de la nappe souterraine.

- Les glissements du type (R) se sont déclenchés sur des pentes allant de 13° à 30° pour des falaises protégées. Les dimensions du glissement diminuent avec la pente.
- En dessous de 13° et jusqu'à 10°, ce sont les glissements, par rupture successive, (S) probablement dus à un mouvement rétrograde, à partir du pied du versant, et s'étendant considérablement en formant des sortes de marches d'escalier.
- De 10° à 8°, on a affaire à une solifluxion avec ondulations plus ou moins bien marquées.

Quant au glissement des talus de l'intérieur, actuellement non soumis à l'érosion marine et fluviale, HUTCHINSON les divise en deux groupes.

- Un groupe représentant la dernière influence de l'érosion marine et fluviale comprenant des glissements du type (S) et (U) sur des pentes comprises entre 12° et 8°, 5⁽¹⁾.
- Un groupe important représenté par des mouvements du type (N) et (L) se déclenchant dans les parties les plus inclinées des talus, sans raison externe apparente. Ils seraient dû à une réduction progressive de la résistance au cisaillement lors du processus d'altération et à une augmentation de la pression interstitielle

(1) - Les falaises côtières affectées par ces deux types ont des pentes variant de 14° à 7°, 75.

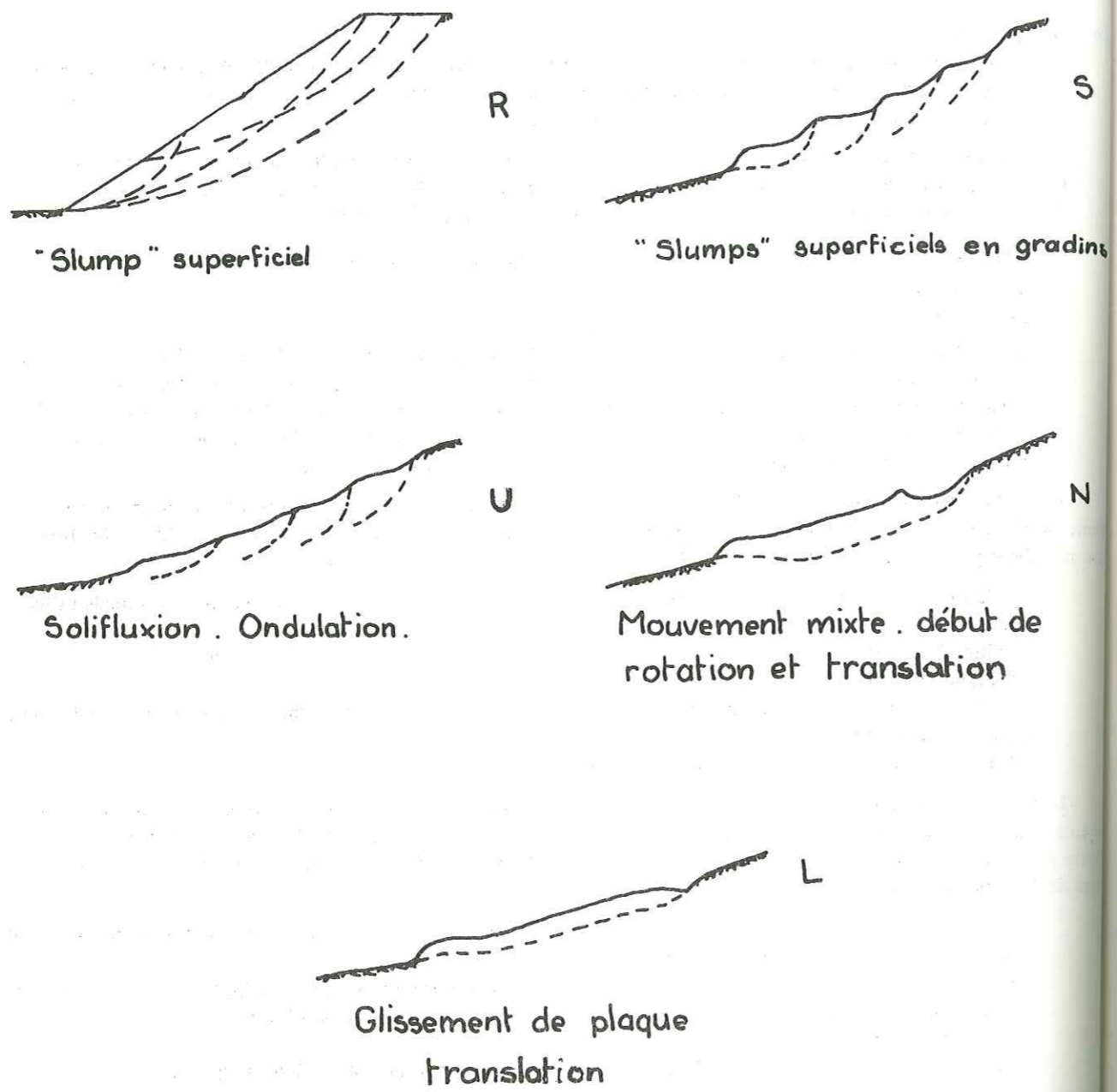
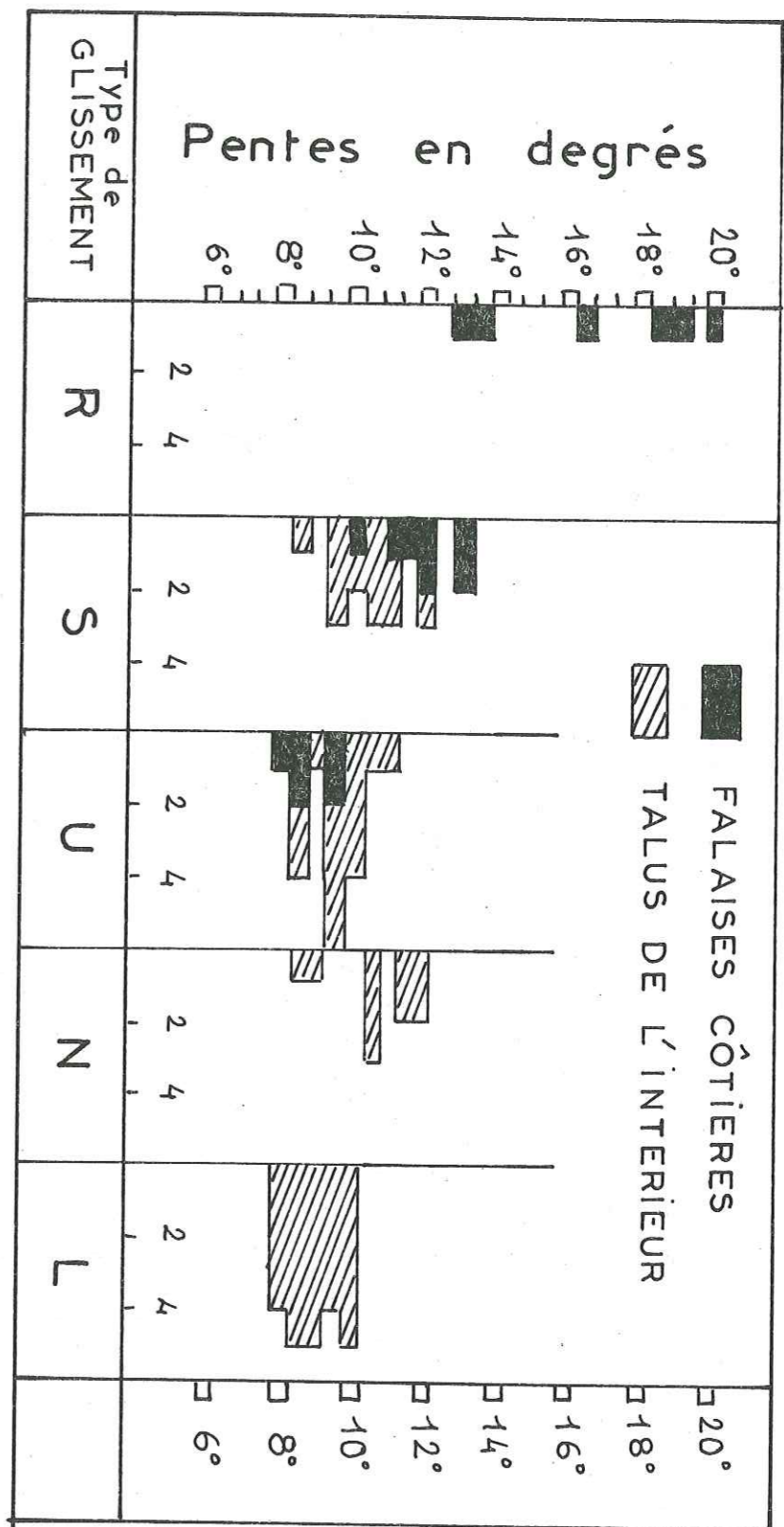


Fig.23 Principaux types de glissements observés par J. N. Hutchinson.

Fig 24 Principaux types de glissements observés et leurs relations avec la pente du talus. d'après J.N.HUTCHINSON.



ayant pour cause, par exemple, le déboisement médiéval et la détérioration du climat de 1550 à 1850 (période appelée "Little Ice Age" par H.H. LAMB).

Tous ces glissements ont lieu dans les argiles de Londres dont les limites de liquidité et de plasticité sont respectivement de 68 % et 25 % pour une teneur en eau moyenne de 28 %.

III° - FACTEURS GEOMETRIQUES INTERNES.

Les formes de surface et la nature des matériaux ne suffisent pas à elles seules, à déterminer l'évolution d'un versant. Il faut tenir compte du facteur essentiel qu'est la disposition de ces matériaux dans l'espace. Nous prendrons donc en considération les paramètres suivants :

- III°, 1 - La forme, l'arrangement et les limites des différents volumes.
- III°, 2 - Les discontinuités affectant ces volumes aussi bien dans le sens vertical qu'horizontal.

III°, 1 - Formes, arrangement, limites des différents volumes.

Les cycles de sédimentation, dans un bassin, étant très variables, il en résulte une hétérogénéité dans l'épaisseur, la forme, la nature des dépôts. Verticalement, ces dépôts peuvent être limités, ou non, par des plans géométriques auxquels on donne le nom de plan de stratification, dans le cas de roches sédimentaires.

III°, 1-1 - Les massifs stratifiés, généralités.

Ils représentent la majeure partie des cas observables dans la nature. On pense évidemment tout de suite aux roches sédimentaires stratifiées ; mais il ne faut pas oublier toutefois que dans les roches cristallines magmatiques, une ségrégation des divers constituants minéraux, par simple gravité, peut donner lieu à un litage assimilable en partie à un plan de stratification (VIALON, 1966). Les terrains meubles peuvent aussi présenter une stratification plus ou moins nette ; ce sont entre autres, les grèzes et éboulis lités, les dépôts lacustres, les dépôts deltaïques. D'un point de vue général, la stratification transmet au massif des propriétés particulières.

- Une telle anisotropie mécanique n'influence pas seulement la résistance et la déformation des masses rocheuses, elle joue aussi un rôle dans la répartition des tensions à l'intérieur du massif ; il y a répartition parallèlement aux couches dans le cas de strates verticales et à peu près perpendiculairement dans le cas de couches inclinées (1).
- Les massifs stratifiés peuvent être considérés, schématiquement, comme le résultat d'une superposition régulière, ou non, de tranches d'épaisseur moyenne variant de quelques centimètres à plusieurs mètres. Ces tranches sont limitées par des surfaces planes soulignées la plupart du temps par de fines pellicules de matière de nature différente du reste de la masse ; ces interlits habituellement argileux, si minces sont ils n'en constituent pas moins les volumes les plus dangereux de toute la superposition, du fait de leur résistance plus faible.
- La stratification détermine ainsi des lignes et des plans continus de moindre résistance au cisaillement guidant les mouvements de la roche et peut être assimilée à un système de fractures orientées.
- La stratification permet l'infiltration et les circulations d'eau dans le massif.
- Dans les roches sédimentaires stratifiées, il faut noter aussi la présence quasi constante de joints transversaux perpendiculaires aux plans de stratification. Le massif prend alors l'allure d'un "corps de maçonnerie sèches". La cohésion, le long des joints, peut être considérée comme nulle ; et suivant l'allure, la forme, l'ouverture, la densité des joints et la pente de la stratification, un tel empilement de volumes élémentaires aura des répercussions souvent défavorables sur la déformabilité du massif tout entier.

(1) - La stratification représente d'ailleurs le principal facteur d'anisotropie.

III°, 1-2 - La forme, l'épaisseur des strates, la fréquence et la nature des interlits, sont autant de paramètres à considérer dès que l'on a affaire à des roches sédimentaires (1).

Une épaisseur de strate constante, dans toute une série géologique, ne pose pas a priori de problème particulier, mais ce cas idéal est relativement rare. La plupart du temps, suivant le rythme de la sédimentation, les dépôts sont de puissances différentes et on trouve de la sorte des sédiments déposés sous la forme de strates minces en supportant d'autres plus épais. Une disposition de ce genre alliée à d'autres facteurs défavorables, telles la pente de la stratification, la présence d'interlits argileux même très minces, peut engendrer des mouvements de versant du style glissement de rochers. Des études portant sur la localisation des éléments de surface de glissement du Mont Toc en rive gauche de la retenue du Vaiont, mettent en évidence l'existence plus fréquente de zones de faiblesse dans les séries à strates peu épaisses (L. BROILLI). Les membres 1 (calcaire du Malm), 3 (Crétacé inférieur), à strates fines et sans interlits argileux ou marneux notables, sont plus aisément déformables. Il en est de même pour les membres 4 (Albien) et 6 (Cénoomanien) (voir tableau n° 14).

Des interlits, même très minces, introduisent des discontinuités dangereuses tant au point de vue géométrique que mécanique. Ces volumes le plus souvent argileux induisent la position des surfaces de glissement, et jouent un très grand rôle vis à vis des sous-pressions.

La succession plus ou moins régulière de couches géologiques de nature différente impose au versant des propriétés particulières pouvant engendrer des phénomènes divers.

- Les alternances de strates peu épaisses de calcaires et de marnes, selon la pente, le degré de fracturation, la présence d'eau sont rapidement la proie de mouvements de fauchage, de tassement ouvrant la voie aux agents d'altération. Le mauvais état de certaines routes des Alpes est dû, en partie, à de telles dispositions.
- La présence de masses de roches dures reposant sur une assise tendre, formes fréquentes dans la nature, sont à l'origine de désordres graves de pieds de falaise ou de cuesta. Il peut y avoir affouillement par les circulations d'eau au contact de marnes imperméables, causant des surplombs dont l'évolution logique sera l'écroulement pur et simple. Le processus se résume aussi souvent à un "foirage" des terrains tendres sous la pression d'une corniche massive ; il est facilité évidemment par la présence d'eau. Cela se traduit par des formes de reliefs caractéristiques de certains pays de plateau et de cuesta : versants boursoufflés, affaissements de paquets importants de roches, corniches estompées, glissements de blocs. J.M. AVENARD a observé de telles dispositions autour de Mirabel en Coirons sur la bordure est du Massif Central ; les marnes du Crétacé supportant des lambeaux de basalte, se déforment fortement, la limite de plasticité = 30,4 % étant facilement atteinte par la teneur en eau de saturation = 34 %. Le versant marneux devient convexe et porte des "boursoufflures" sous l'effet de la pression verticale imprimée par le plateau basaltique et de celle oblique venant du reste du versant. Ce phénomène peut aller jusqu'à l'écroulement de la bordure du plateau. Dans certains cas, si la couche tendre est de plus malléable, le volume de roches dures, en s'éboulant, glissera sur celle-ci et s'y enfoncera même ; la corniche est dite alors "estompée" ; en Lorraine les exemples sont fréquents dans les séries calcaires bajociennes aaléniennes et marneuses toarciennes.
- Les problèmes de stabilité se posent avec la même acuité pour des séquences lithologiques fines. La structure d'une argile varvée est assimilable à une sorte de stratification conduisant à une succession de lits sableux et argileux. Suivant leur nature, les niveaux sableux représentent des zones de faiblesses potentielles responsables de mouvements différentiels couches sur couches.

III°, 1-3 - Pente de la stratification.

La stabilité d'un massif stratifié dépend avant tout de la pente que font les plans de stratification avec la surface topographique. Quatre cas peuvent se présenter :

- stratification horizontale.
- stratification verticale.
- stratification oblique conforme à la pente topographique.
- stratification oblique inverse à la pente topographique.

(1) - Pour tous renseignements utiles, on consultera les travaux du professeur LOMBARD.

TABLEAU N° 14 - VARIATION DE L'ÉPAISSEUR DES STRATES ET POSITION DE LA SURFACE DE GLISSEMENT DANS LE SITE DU BARRAGE DE VAJONT

Formations	Membre	Épaisseur moyenne en cm	Position de la surface de glissement.		
			Zone Est	Zone Centrale	Zone Ouest
		0 20 40 60 80 100 120			
A		[Diagramme de stratification horizontale]			
B		[Diagramme de stratification horizontale]			
C	1	[Diagramme de stratification verticale]		[Diagramme de surface de glissement]	
	2	[Diagramme de stratification horizontale]	[Diagramme de surface de glissement]		
	3	[Diagramme de stratification horizontale]			
	4	[Diagramme de stratification horizontale]	[Diagramme de surface de glissement]		
	5	[Diagramme de stratification horizontale]	[Diagramme de surface de glissement]		
	6	[Diagramme de stratification horizontale]	[Diagramme de surface de glissement]		
	7	[Diagramme de stratification horizontale]			
	8	[Diagramme de stratification horizontale]			
D		[Diagramme de stratification horizontale]			

D'après L. BROILI in Felsmechanik und Ingenieur geologie Vol V/1, p. 59, 1967.

III°, 1-3 1 - Stratification horizontale.

Si les plans de stratification sont horizontaux, le versant peut être considéré comme stable et sa pente critique est verticale, si l'on fait abstraction des notions établies ci-avant. Les mouvements susceptibles d'affecter de tels massifs seront dus à l'action du gel, de la pression interstitielle combinée à une fracturation adéquate.

III°, 1-3 2 - Stratification verticale.

Dans le cas de strates verticales, la stabilité d'un versant peut être assurée vis à vis du glissement de roches banc sur banc. Mais, une telle disposition favorise grandement l'action de la pesanteur, il y aura appel au vide dans toute la partie extérieure du talus et fauchage. Ce mécanisme, facilité par les agents d'altération agissant à la faveur des joints et plans de stratification devenant béants, peut intéresser des tranches de terrain épaisses jusqu'à de grandes profondeurs, (certains aménagements hydroélectriques ont mis en évidence des fauchages affectant des épaisseurs de 2 à 300 m). Selon la rigidité de l'ensemble, les zones de rupture sont plus ou moins nombreuses et aboutissent à une dislocation généralisée. Le secteur parallèle à la surface du versant, au long de laquelle se manifeste la torsion des bancs, évolue à la longue en surface de glissement et provoque ainsi des mouvements couvrant de grandes superficies, ceci est fréquent dans les Alpes, soit dans les séries sédimentaires, soit dans les séries métamorphiques (fig. 25).

III°, 1-3 3 - Stratification oblique.

Si les plans de stratification sont inclinés par rapport à la surface topographique, l'angle de talus critique dépend de l'orientation de ces plans, ainsi que des joints transversaux.

a) Les plans de stratification plongent vers l'intérieur du versant (versant inverse) ; dans ce cas le talus est stable par rapport au glissement de roches. Mais comme précédemment, une telle inclinaison est favorable au fauchage, spécialement dans les alternances calcaires-marnes. Dans la figure 26 a, les plans plongent vers l'intérieur du talus avec un certain angle α ; considérons une droite AA perpendiculaire à la stratification passant par la base du talus, elle fait $90 - \alpha$ avec l'horizontale. Si $90 - \alpha$ est inférieur ou égal à l'angle de frottement ϕ le long des parois des joints, théoriquement aucune fissure ne peut apparaître le long de la ligne AA même si les joints transversaux ne sont pas disposés en quinconce.

Si les joints transversaux sont parallèles à AA, mais décalés, la position du talus critique dépend de la valeur moyenne du rapport C/D entre la longueur moyenne de décalage entre les joints (C) et l'espace moyen (D) entre les couches stratifiées (voir figure 26 b). Pour toute valeur donnée de α , l'angle de talus critique augmente avec l'augmentation du rapport C/D, il diminue avec des valeurs décroissantes de $90 - \alpha$ jusqu'à $90 - \alpha = \phi = 30^\circ$. Si α approche de 90° , il y a danger de flambage des couches (1).

b) La pente de la stratification est conforme à la pente topographique, c'est-à-dire des strates plongeant vers l'extérieur du talus. Cette disposition est éminemment favorable aux glissements de roches (rockslides) et à tous mouvements se produisant couche sur couche (voir tableau n° 15). Le pendage de couche α par rapport à l'angle de talus β est le seul facteur intervenant dans le coefficient de sécurité (il faudrait tenir compte aussi de la cohésion qui est loin d'être toujours nulle).

- Si β supérieur à α (fig. 27 a), il y a risque de mouvements différentiels bancs sur bancs. Si F = coefficient de sécurité et W = poids du prisme ABC.

$$W \sin \alpha = \frac{W \cos \alpha}{F} ; \text{tg } \phi' + c' \frac{AC}{F}$$

$$\text{soit } F = \frac{W \cos \alpha \text{ tg } \phi' + c' AC}{W \sin \alpha}$$

d'où en considérant $c' = 0$

$$F = \frac{\text{tg } \phi'}{\text{tg } \alpha}$$

Le facteur dominant intervenant dans le calcul du coefficient de sécurité est donc le pendage des couches.

(1) - ϕ = angle de frottement entre les parois des joints de stratification.

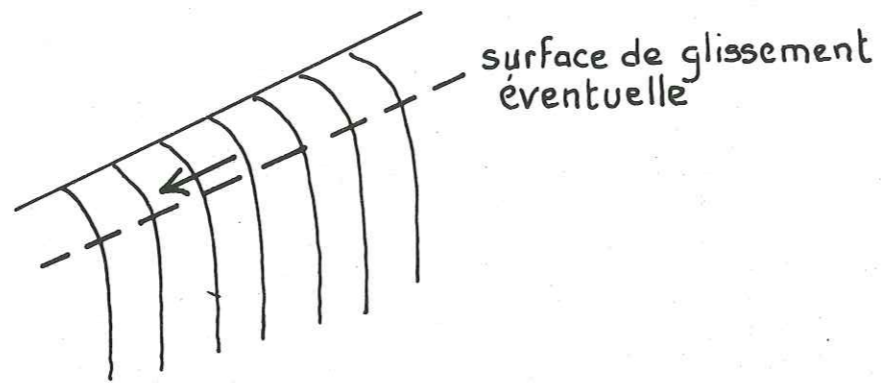


Fig 25: Fauchage de couche

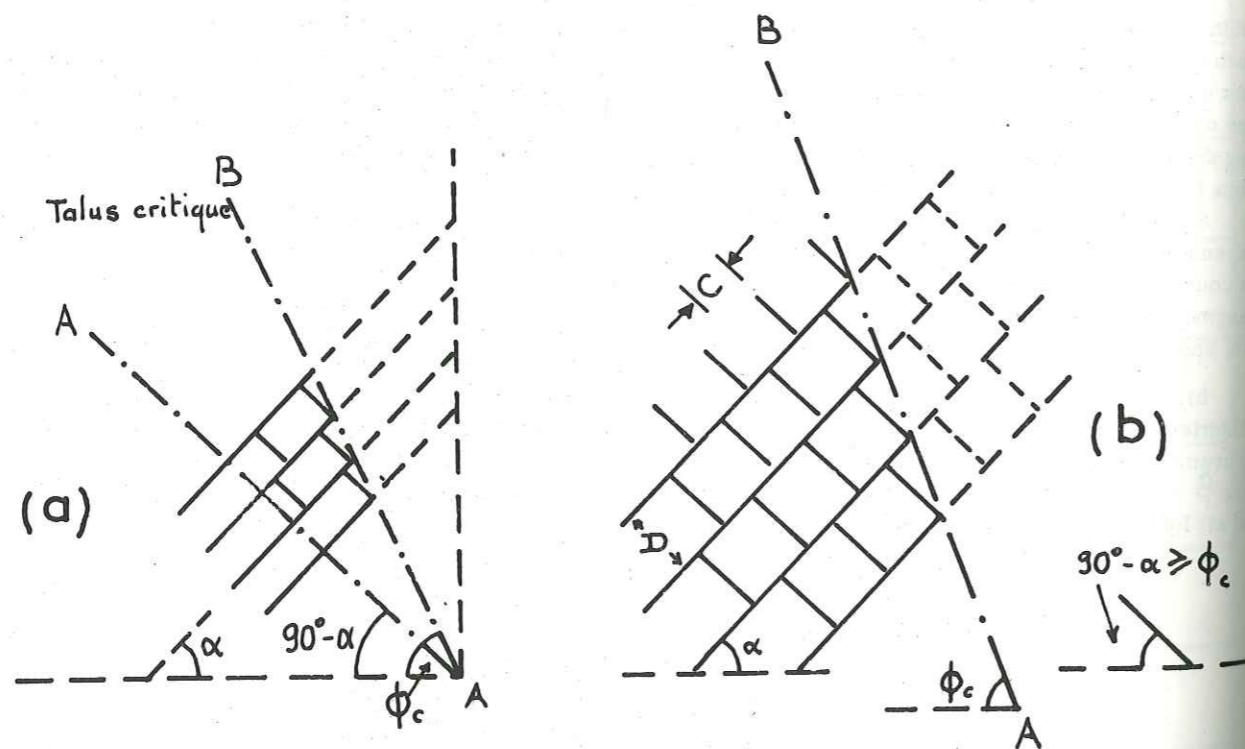


Fig 26 a-b Influence de la stratification sur la stabilité des talus

TABEAU N° 15 - VALEURS DE PENDAGE DES COUCHES POUR QUELQUES GLISSEMENTS DE ROCHES

LOCALISATION	DATE	NATURE DES TERRAINS	PENTE de la STRATIFICATION
SAIDMARREH (Iran)	Préhistorique	Calcaires	environ 20° (conforme)
FLIMS (Suisse)	Préhistorique	Calcaires	environ 18° (conforme)
GOLDAU (Suisse)	2 septembre 1806	Calcaires + Nagelfluh.	environ 20° (conforme)
GROS-VENTRE (Wyoming U.S.A.)	23 juin 1925	Grès + Argile + marnes	environ 18° (conforme)
MADISON CANYON (U.S.A.)	17 août 1959	Calcaires + schistes	environ 30° (conforme)
VAJONT LONGARONE (Italie)	9 octobre 1963	Calcaires	environ 40° (conforme)

- Si β inférieur ou égal à α (fig. 27 b), les joints de stratification ont une pente plus forte que celle du talus, qui peut être considérée alors comme stable. Là, encore, le fauchage est susceptible d'être actif.

La pente du substratum, ou d'un horizon plus solide, joue un rôle similaire à celui de la stratification vis à vis du volume constitué par les terrains meubles de couverture. Les placages morainiques sont relativement instables et donnent lieu fréquemment à des coulées. Les alluvions, dépôts argileux lacustres ou non, se sédimentant au gré des cycles glaciaires, reposent en général sur un substratum érodé irrégulièrement. Dans le cas de pente défavorable, cette limite substratum - terrain de couverture constituera une ou plusieurs surfaces de glissement.

III°, 2 - La fracturation.

La stratification quand elle existe peut être déjà retenue comme une fracturation relativement homogène, continue. La plupart du temps, cette géométrie n'est pas simple car à la suite des nombreuses contraintes tectoniques, le rocher stratifié ou non, a été soumis à une fracturation intense d'orientation multiple et discontinue. Quelle que soit sa forme, son importance, sa nature, sa densité, elle contribue à affaiblir les propriétés mécaniques du massif considéré. Les diverses fractures grandes ou petites vont découper le versant en un système de blocs irréguliers reliés entre eux par des ponts de matière. La solidité d'un tel volume sera essentiellement une résistance de liaison, or ces "ponts de matière" ont une résistance résiduelle très limitée par rapport aux diverses contraintes s'exerçant sur les parois des fissures. En déterminant des lignes de moindre résistance, elles sont susceptibles de guider les mouvements des roches, et peuvent induire des surfaces de glissement éventuelles.

Les failles sont par définition des fractures de dimensions importantes, suffisamment continues pour délimiter des glissements importants. Le coefficient de sécurité, vis à vis de la rupture, est directement déterminé par l'inclinaison du plan de faille, l'orientation de ce plan par rapport au versant, par la forme des volumes ainsi constitués (forme de dièdre très néfaste) et par la résistance au cisaillement le long de ce même plan.

Les plans de schistosité et de foliation, suivant leur orientation et leur pendage, constituent autant de surfaces élémentaires de glissement, la présence de minéraux tendres, tel le mica, le long de ces plans facilite les mouvements, en particulier, dans le cas de glissements de débris. Luciano Jacques de MORAES a constaté qu'au Brésil, la plupart des glissements ont lieu dans des formations sédimentaires ou métamorphiques soumises à la schistosité ; ce sont le cas des régions de Santos, de Rio de Janeiro, de la Serra do Mar, de la Serra da Mantigueira, de la Serra do Espinhaco. Le réseau de fractures a une influence sur la pénétration de l'eau dans un massif.

- L'eau entrant dans les pores de la roche modifie la cohésion et le frottement interne de la masse qui peut ainsi tomber à zéro d'après L. MULLER et donc modifier radicalement la solidité du versant.
- L'eau pénétrant dans les fissures et pouvant ou non circuler va créer des pressions à l'intérieur du massif. En l'absence d'exutoires possibles, ces pressions peuvent être très importantes et occasionner brusquement la rupture.
- Les fractures importantes peuvent jouer un rôle de drains naturels, contribuant à humidifier les matériaux des terrains de couverture les masquant et déjà susceptibles d'instabilité par leur nature.

La fracturation à grande échelle (faille, chevauchement) a aussi une action indirecte dans la stabilité d'une région : en délimitant des secteurs plus profonds de remplissage alluvial ou morainique, en remontant à la surface des couches de terrains meubles, en modifiant les pendages. Elle permet ainsi d'expliquer la localisation précise et la délimitation nette de certains glissements à l'intérieur d'un ensemble jugé stable.

T. ONODERA (1957) a étudié le rôle de la fracturation en grand, sur la "susceptibilité" de flancs de montagnes au glissement de roches. Nous résumerons brièvement ses constatations ; l'étude a été effectuée dans les montagnes bordant la vallée de la rivière Monobe dans l'île Shikoku au Japon. Les observations ont été faites après une courte période de pluies ayant contribué au déclenchement d'un certain nombre de glissements (735,2 mm de pluie entre le 13 et le 22 juillet 1937) et elles ont porté sur la stratigraphie et la fracturation.

Les principales formations géologiques sont les suivantes :

- Des alternances de grès et de schistes avec quelques intercalations de calcaires et silex, représentant le Paléozoïque supérieur plissé et en contact anormal avec les séries crétacées par faille.
- Des grès et schistes massifs de pendage 40° - 80° Nord formant une partie du Paléozoïque supérieur et du Trias.

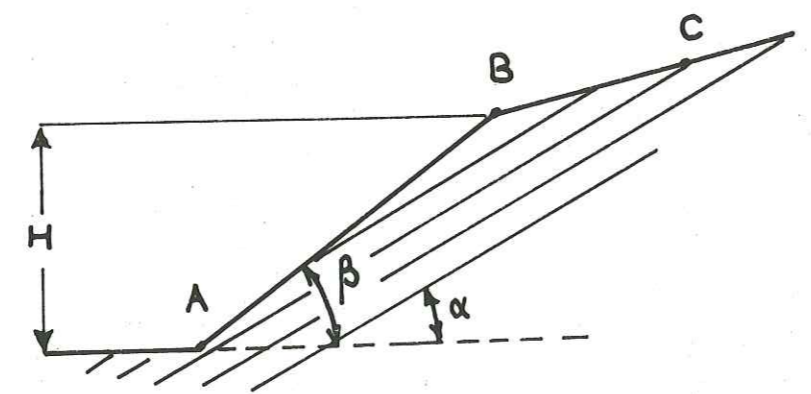


Fig: 27a Influence de la pente de la stratification sur la stabilité des talus cas $\beta > \alpha$

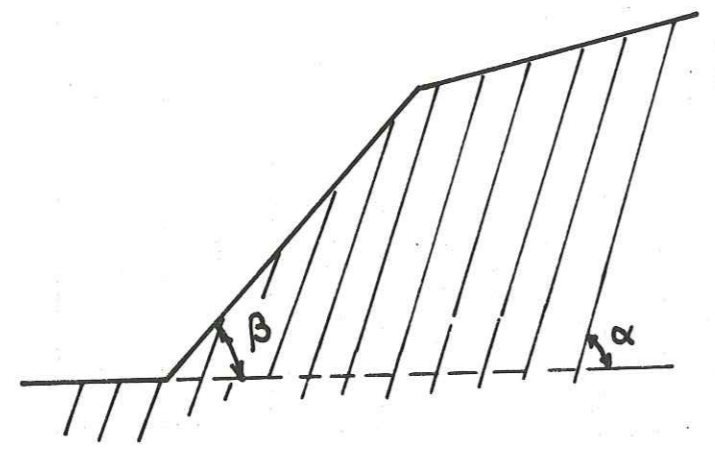


Fig 27b Influence de la pente de la stratification sur la stabilité des talus cas $\beta \leq \alpha$

- c) Des alternances de schistes, grès, calcaires, cherts plissés constituant la série Akigawa.
 - d) Des grès et schistes avec intercalations de calcaires et conglomérats plissés irrégulièrement, formant la série Torinosu ; les contacts avec les autres formations se font par failles.
 - e) Des alternances grès et conglomérats pour le Crétacé inférieur et schistes et grès pour le Crétacé supérieur ; les schistes sont affectés par une schistosité intense.
 - f) Dépôts diluviaux : sables, graviers, argiles formant des terrasses bordées par des failles.
- Il existe deux systèmes de failles d'âge post-crétacé de direction nord est - sud ouest et nord sud. Les pentes se distribuent de la façon suivante :

	c ; m ; M. (1)	K. (2)	c.s.M. (3)
Exposition sud	1/3, 1	1/3, 8	1/2, 2
Exposition nord	1/2, 8	1/2, 7	1/2, 4

ONODERA a reporté dans trois tableaux (n° 16 a-b-c) :

- la superficie de chaque formation géologique et la longueur de failles contenues dans ces formations ;
- le nombre de glissements de roches, par formation, affectées ou non par des failles ;
- le nombre de glissements de roches dans les formations affectées par des failles et par kilomètre de faille.

On en déduit :

- que la "susceptibilité" des pentes montagneuses au glissement de roches dépend des formations géologiques (parmi les secteurs situés en dehors des réseaux de failles, c'est la formation Akigawa qui est la plus sensible).
- que cette "susceptibilité" est augmentée par la présence de failles, mais que cette augmentation dépend aussi de la formation considérée et du système de faille. Ainsi les formations Akigawa et Torinosu seraient les plus sensibles (schistosité forte).

Tableau n° 16a - Extension de chaque formation et longueur de faille.

FORMATION GEOLOGIQUE	Surface en Km ²	LONGUEUR DE FAILLE (Km)		TOTAL
		N.E. - S.W.	N. - S.	
Diluvium	7,3	-	-	-
Crétacé	20,4	17,2	3,0	20,2
Torinosu	4,3	23,8	2,5	26,3
Akigawa	33,4	14,8	5,2	20,0
Sambozan	10,8	33,3	2,0	35,3
Paléozoïque	1,8	3,5	0,0	3,5
TOTAL	78,0	92,6	12,7	105,3

- (1) - c.m.M. = montagnes bordant le cours moyen de la Monobe.
- (2) - K. = montagnes bordant le cours du Kaminiro.
- (3) - c.s.M. = montagnes bordant le cours supérieur de la Monobe.

Tableau n° 16b - Nombre de glissements de roches : le chiffre () indique le nombre par Km

FORMATION GEOLOGIQUE	Nombre en dehors du système de failles	Nombre à l'intérieur du système de failles		TOTAL
		N.E. - S.W.	N. - S.	
Diluvium	- (-)	-	-	-
Crétacé	3 (0,1)	19	-	22
Torinosu	4 (0,9)	25	3	32
Akigawa	65 (1,9)	28	22	115
Sambozan	2 (0,2)	27	4	33
Paléozoïque	- (-)	-	-	-
TOTAL (moyenne)	74 (0,9)	99	29	202

64 % des glissements de roches sont en relation directe avec le système de faille dont 49 % dans le système à direction N.E. - S.W. et 15 % dans le système à direction N. - S.

36 % se déclenchent en dehors des secteurs faillés.

- La formation Akigawa est très sensible aux glissements même en dehors des influences tectoniques. Ensuite vient la série Torinosu, puis Sambozan et Crétacé.
- La susceptibilité dans le système faillé dépend de l'orientation N.E. - S.W. ou N.S.. La "susceptibilité" totale est dans l'ordre décroissant : Torinosu, Akigawa, Sambozan, Crétacé.
- L'orientation des pentes pourrait jouer un rôle pour la formation Akigawa, 30 glissements sur 65 ont lieu sur des faces sud et 35 sur des faces nord.
- Il n'y a pas de relation évidente entre la pente et le nombre de glissements.
- Les termes lithologiques affectés sont pour Akigawa : les lits sableux et schisteux ; pour Torinosu : surtout la partie schisteuse ; pour le Crétacé : exclusivement la partie schisteuse.

Tableau n° 16c - Nombre de glissements de roches par km de faille dans le secteur d'étude faillé.

FORMATION GEOLOGIQUE	Glissement au km le long des failles		MOYENNES
	N.E. - S.W.	N. - S.	
Diluvium	-	-	-
Crétacé	1,1	0,0	0,9
Torinosu	1,1	1,2	1,1
Akigawa	1,9	4,2	2,5
Sambozan	0,8	2,0	0,9
Paléozoïque	-	-	-
MOYENNES	1,9	2,9	2,0

Les failles N. S. ont plus d'influence que celles N. E. - S. W.. La série Akigawa est plus influencée par la présence de failles.

IV° - FACTEURS : NATURE ET PROPRIETES DES MATERIAUX.

La nature des matériaux constitue un des paramètres importants à prendre en considération dans la recherche des causes d'instabilité. Les variations dans la nature chimique, pétrographique, minéralogique, physique influent directement sur les propriétés mécaniques.

Nous retiendrons trois grands groupes de terrains dangereux faisant intervenir d'une façon ou d'une autre des données sur le pourcentage d'argile, l'épaisseur de la couche d'argile, la nature des minéraux argileux.

IV°, 1 - Les terrains "déformables" et les formations à faiblesse potentielle.

Nous plaçons dans ce groupe les schistes, les marnes, les charbons, les roches micacées, les roches serpentineuses, talqueuses. Ces formations ont été soumises au cours de l'histoire géologique à des efforts considérables, tels que ceux développés par la tectonique ou le métamorphisme. Il en résulte pour certaines d'entre elles des zones de faiblesse potentielle sensibles aux agents d'altération susceptibles de faire passer suivant un temps plus ou moins long le matériau de l'état solide compact à l'état divisé ; cette opération s'accompagne toujours de formation d'argile.

L'action des agents atmosphériques (pluie, soleil, gel) et des eaux superficielles ou non provoque en effet une altération plus ou moins rapide de toute roche. Les talus faits de tels matériaux sont stables, s'ils sont secs ou convenablement drainés. Mais certaines couches de résidus d'altération sont tellement saturées qu'elles se mettent à s'écouler même sur des pentes très faibles.

- Si, la pente aidant, le ruissellement est suffisamment énergique, les produits de la décomposition des roches sont rapidement éliminés au fur et à mesure de leur formation.
- Par contre en région plate, ou en présence d'obstacle à l'écoulement, les résidus d'altération se concentrent et favorisent l'action des eaux de percolation (dissolution du calcaire - hydrolyse des feldspaths etc.). On obtient en final des dépôts à dominante argileuse, qui, saturés, peuvent obéir aux lois de la solifluxion.

K. TERZAGHI distingue deux choses :

- Les résidus d'altération ne donnent lieu à des glissements, sur des pentes faibles, que lorsqu'ils sont constitués "par des fragments peu résistants, friables et partiellement décomposés". Ceci est fréquent dans les couches faites de fragments de schistes renfermant de la chlorite, des micas, du talc. Les saisons sèches contribuent à la désagrégation des fragments, les saisons humides saturent le matériau.
- Sur les pentes abruptes "les glissements se produisent généralement lors de la fonte des neiges et plus rarement au cours de fortes averses". La compacité et la nature pétrographique ne rentrent plus en ligne de compte ; et la cause unique résiderait dans les poussées d'écoulement des eaux d'infiltration.

IV°, 2 - Les formations sableuses à cohésion faible ou nulle.

Un sable non argileux situé au-dessus de la nappe peut être considéré comme stable. Il n'en sera pas de même s'il est saturé ; un sable peu compact et saturé par une liquéfaction spontanée donne lieu à des coulées, ceci sous l'effet de chocs ou de variations rapides du niveau de nappe. Ces coulées ont une forme particulière : en éventail ; elles sont fréquentes sur les côtes Hollandaises notamment à la suite de marées de hauteur exceptionnelle.

Des niveaux sableux ou des lentilles de sablons interstratifiés dans des masses argileuses (argile varvée par exemple) constituent des zones de moindre résistance au cisaillement et à danger d'érosion souterraine, surtout s'ils sont humides. Nous avons pu constater l'influence de tels niveaux dans les argiles grises varvées affleurant le long de la R. N. 84 entre Bellegarde et Longeray (Ain) ; les lentilles de sablons se liquéfient et s'écoulent rapidement dès qu'elles sont entaillées naturellement ou artificiellement.

Le loess, sol fin, déposé par le vent, possède une certaine cohésion due à des films très minces de liant soluble. Il est stable tant qu'il reste au-dessus du niveau de la nappe, mais dès qu'il est immergé, le ciment se dissout et le loess perd toute cohésion. Il ne restera stable que pour une porosité inférieure à 47 %. Des expériences ont été faites dans le Turkestan sur les parois non revêtues (pente 1,5/1) d'un canal d'irrigation creusé dans du loess, au bout de quelques semaines le terrain autour de la fouille avait tassé de 6 mètres et le pied de talus s'était affaissé de 0,75 m.

IV°, 3 - Les problèmes posés par la présence d'argile.

Les matériaux argileux par leur présence dans un versant ont toujours été considérés comme l'une des causes majeures des mouvements de terrain, du fait de leur propriétés particulières qui les font considérer comme un des plus mauvais terrains qui soit.

IV°, 3-1 - La présence d'argile même en faible pourcentage, modifie complètement le comportement mécanique et hydraulique d'un terrain aussi bien dans le sens "bon terrain" que dans celui de "mauvais terrain". MIELINZ et KING (1935) (1) ont montré par exemple que l'addition de faibles pourcentages d'argile à un sable ou à un limon augmentait considérablement sa résistance à la compression et que le maximum de résistance pour de tels mélanges pouvait être supérieur à la résistance des éléments pris séparément à savoir le sable, le limon, l'argile. Des résultats montrent d'ailleurs que la résistance croît avec la quantité d'argile suivant cet ordre : montmorillonite illite - kaolinite pour les mélanges à faible teneur en argile (5 à 10 %). La présence d'argile dans un sable serait donc bénéfique car elle lui procure une certaine cohésion. Mais cette résistance croît avec la teneur en eau jusqu'à une valeur maximale au-delà de laquelle il y a diminution rapide. Or l'argile, quoique étant le matériau imperméable par excellence, peut par contre avoir une porosité forte influençant directement la teneur en eau.

IV°, 3-2 - L'épaisseur de matériau argileux, joue évidemment un grand rôle ; précisons toutefois qu'un mince film d'argile suffit à lui seul à créer un risque de glissement. On connaît dans le monde des ruptures survenues sur une couche de 3 à 4 cm. L'existence de tels films dans un massif stratifié à pente conforme présente les conditions favorables à un glissement de roches.

Les grandes épaisseurs d'argile : moraines, dépôts lacustres, résidus d'altération, argiles post-glaciaires posent de graves problèmes à l'ingénieur au stade des prévisions, surtout si elles sont le seul constituant lithologique d'une région.

IV°, 3-3 - Propriétés fondamentales des argiles.

Depuis ces dernières années, de nombreux auteurs (2) se sont penchés sur les propriétés des argiles aussi bien dans un but fondamental que pratique.

IV°, 3-3 1 - La perméabilité.

La perméabilité d'une argile est en général très faible ; suivant sa position la couche argileuse limite verticalement ou horizontalement l'écoulement ou conditionne l'existence de sous-pression en obstruant les exutoires. Elle a une influence sur la vitesse avec laquelle l'indice de vide croît, pour une charge croissante, ou sur la résistance au cisaillement, en fonction de la vitesse d'application de l'effort. La perméabilité propre d'un sédiment argileux dépend de nombreux facteurs :

- la composition minéralogique : l'addition de 10 % de mica à un sable ramène la perméabilité à celle du mica pur, par exemple. La kaolinite réduit plus la perméabilité que le mica et la montmorillonite encore plus (voir tableau n° 17).
- l'indice de vides (fig. 28).
- la granulométrie.
- les cations échangeables (fig. 29).
- le degré de saturation.
- la forme des particules argileuses : la forme en plaquette réduit plus efficacement la perméabilité que la forme en fibre ou en grain (l'attapulgite sera plus perméable que la montmorillonite).

Tout accroissement de perméabilité si minime soit-il favorise en outre le gonflement et l'adsorption.

(1) - MIELINZ, R.C. et KING, M.E. "Physical chemical properties and Engineering performance of clays" Calif. Div. Mines - Bull. 169, p. 196-254 (1955).

(2) Tous les travaux de BJERRUM, GRIM, LAMBE et MARTIN, MIELINZ, ROSENQUIST, SKEMPTON, TERZAGHI, sont d'une grande importance pour l'étude des glissements.

TABLEAU N° 17 - PERMEABILITE DES ARGILES ET MELANGES SABLE - ARGILE.

ARGILE ET MELANGE	PERMEABILITE : k en cm/min. <i>pour une charge de 65 kg/cm².</i>
SABLE SILICEUX (Quartz)	1×10^{-3}
QUARTZ : MICA 9 : 1 1 : 3 1 : 1 0 : 1	$4,6 \times 10^{-4}$ $4,2 \times 10^{-4}$ $5,8 \times 10^{-4}$ $4,9 \times 10^{-4}$
QUARTZ : KAOLIN 9 : 1 7 : 3 1 : 1 0 : 1	$9,5 \times 10^{-5}$ $8,9 \times 10^{-6}$ $2,5 \times 10^{-6}$ $3,0 \times 10^{-6}$
QUARTZ : MONTMORILLONITE Ca 9 : 1 7 : 3 1 : 1 0 : 1	$4,3 \times 10^{-5}$ $2,1 \times 10^{-6}$ $5,5 \times 10^{-7}$ $2,0 \times 10^{-7}$
QUARTZ : MONTMORILLONITE Na 9 : 1 7 : 3 1 : 1 0 : 1	$1,6 \times 10^{-7}$ $3,0 \times 10^{-8}$ imperméable imperméable

in R.E. GRIM "Clay mineralogy in relation to the Engineering properties of clay material"
Applied clay mineralogy (1962) p. 241.

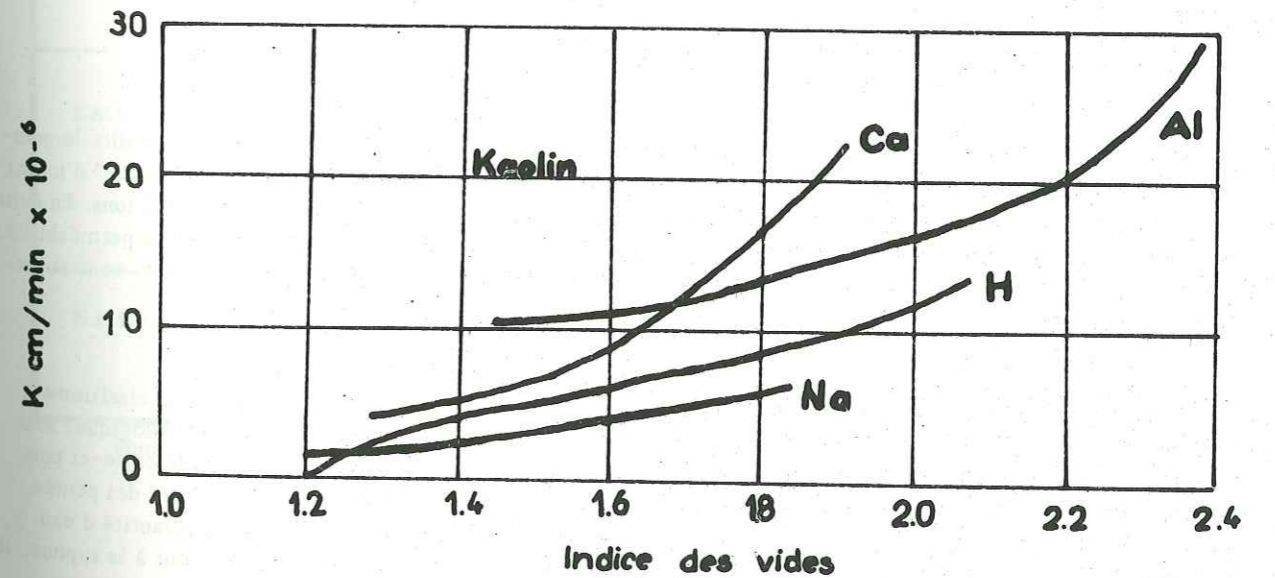
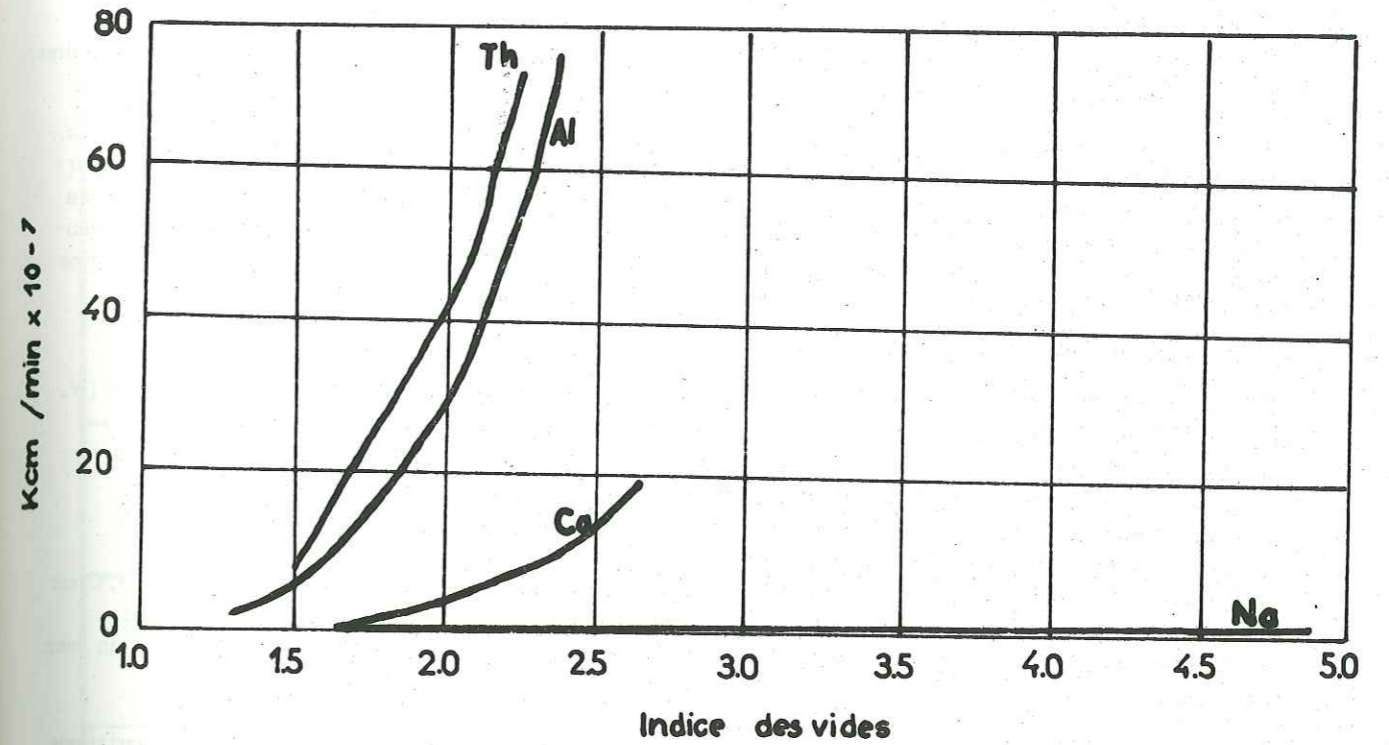


Fig. 28 Perméabilité en fonction de l'indice des vides, d'après Samuels (1950)

IV°, 3-3 2 - Adsorption d'eau et gonflement.

L'adsorption d'eau par les argiles conduit à un gonflement donc une expansion (swelling). Ce mécanisme est primordial dans les mouvements de coulées et de solifluxion ; d'après MIELENZ et KING, deux processus interviennent dans le gonflement des sols.

- Une relaxation de la force de compression effective se traduisant par un élargissement des films capillaires.
- Une "imbibition osmotique" de l'eau par les argiles ayant une structure expansive.

Le gonflement est variable et plus ou moins rapide, suivant la nature et le pourcentage de minéraux argileux, les ions échangeables, la teneur en électrolytes, la granulométrie, la densité, la dimension des vides et leur répartition (voir tableau n° 18, fig. 30 à 33). Les montmorillonites ayant le pouvoir d'adsorber d'épaisses couches d'eau entre leurs couches siliceuses présentent donc les plus forts gonflements et seront donc les plus dangereuses. Un gonflement, dû à l'humidité, peut se manifester parfois dans des argiles fortement préconsolidées, ayant un fort indice de plasticité (TERZAGHI - 1955).

IV°, 3-3 3 - Les limites d'Atterberg.

On a trouvé qu'il était commode d'exprimer les propriétés plastiques d'un sol par ses limites de plasticité (W. P. ou L. P.) - limite de liquidité (W. L. ou L. L.) - indice de plasticité (Ip.) - indice de liquidité (Il.).

La limite de plasticité est "la teneur en eau exprimée en pourcentage pondéral du sol séché à l'étuve, à laquelle le sol peut être roulé en boudin de 1/8 de pouce de diamètre sans se casser en morceau."

La limite de liquidité est "la teneur en eau exprimée en pourcentage pondéral du sol séché à l'étuve, à laquelle le sol commence juste à s'écouler lorsqu'on lui donne le moindre choc."

L'indice de plasticité est la différence entre limite de liquidité et celle de plasticité (Ip = L. L. - L. P.). C'est l'échelle des teneurs en eau pour laquelle un sol est plastique.

L'indice de liquidité Il. permet d'exprimer la teneur en eau naturelle d'un sol ou d'une argile en relation avec ses limites (Il. = $\frac{W. - L. P.}{Ip.}$).

Le franchissement de ces limites par la teneur en eau sous l'effet d'agent extérieur va provoquer des variations dans la consistance, la cohésion, la résistance au cisaillement du sol. Les mouvements et déformations plastiques telle que la solifluxion dépendent de ce processus.

IV°, 3-3 4 - Activité et sensibilité des sols (1).

Depuis les travaux des Scandinaves, des Anglais et des Canadiens, on doit considérer une catégorie de sols ayant une grande susceptibilité au glissement :

les sols "actifs" et "sensibles".

a) L'activité.

Dans une couche d'argile le rapport de l'indice de plasticité Ip et la proportion d'argile (c'est-à-dire le pourcentage de particules inférieures à 2 microns) est pratiquement constant, on le définit comme "l'activité" d'un sol argileux. Les argiles actives ont un fort pouvoir de rétention d'eau, une grande capacité d'échanges d'ions. En outre d'après GRIM, elles sont fortement thixotropiques, ont peu de résistance au cisaillement et une faible perméabilité. Elles posent donc de graves problèmes, il ne faut cependant pas en conclure que les argiles inactives ne sont pas susceptibles de glisser.

b) La sensibilité des argiles.

Les sols et argiles sensibles sont ceux qui, évidemment, présentent peu ou pas de résistance au cisaillement après avoir été remaniés. Les argiles, qui ont été fortement préconsolidées au cours de l'histoire géologique, sont insensibles. Les sols sensibles ont en général une faible teneur en eau, mais une rapide variation de celle-ci peut causer un grand accroissement de la sensibilité et avoir ainsi des conséquences néfastes sur la stabilité des pentes.

Quelques uns pensent que de tels matériaux ont une texture lâche pouvant abriter une forte quantité d'eau interstitielle et dans laquelle il y a peu de liaisons entre particules. Si ces quelques liaisons arrivent à la rupture, il

(1) - Pour les définitions, se reporter au paragraphe des critères de classification.

TABLEAU N° 18 - VALEURS DE GONFLEMENT LIBRE POUR DIVERS MINÉRAUX ARGILEUX (d'après MIELENZ et KING, 1955)

MINÉRAUX ARGILEUX - LOCALISATION	GONFLEMENT en %
<p><u>MONTMORILLONITE Ca :</u></p> <p>Forest, Mississippi Wilson Creek Dam, Colo Davis Dam, Arizona Osage, Wyoming (préparée à partir de Montmorillonite Na).</p>	<p>145 95 45 - 85 125</p>
<p><u>MONTMORILLONITE Na :</u></p> <p>Osage, Wyoming</p>	<p>1400 - 1600</p>
<p><u>HECTORITE Na :</u></p> <p>Hector, Californie</p>	<p>1600 - 2000</p>
<p><u>ILLITE :</u></p> <p>Fithian, Illinois Morris, Illinois Tazewell, Virginie</p>	<p>115 - 120 60 15</p>
<p><u>KAOLINITE :</u></p> <p>Mesa Alta, Nouveau Mexique Macon, Georgie Langley, Caroline du Nord</p>	<p>5 60 20</p>
<p><u>HALLOYSITE :</u></p> <p>Santa Rita, Nouveau Mexique</p>	<p>70</p>

Pour la montmorillonite au Sodium, le gonflement décroît énormément lorsqu'on remplace le Sodium par d'autres ions monovalents ou par des ions di ou trivalents.

Vitesse de gonflement, mm/jour

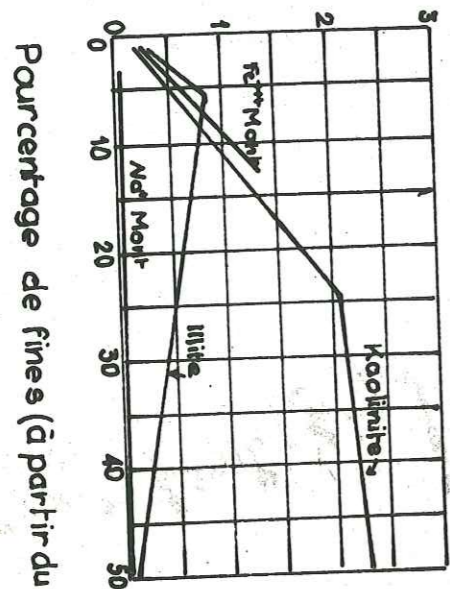


Fig. 31 Influence de la nature de l'argile sur le gonflement dû au gel, d'après Lambé (1953).

K en cm/min x 10⁻⁶

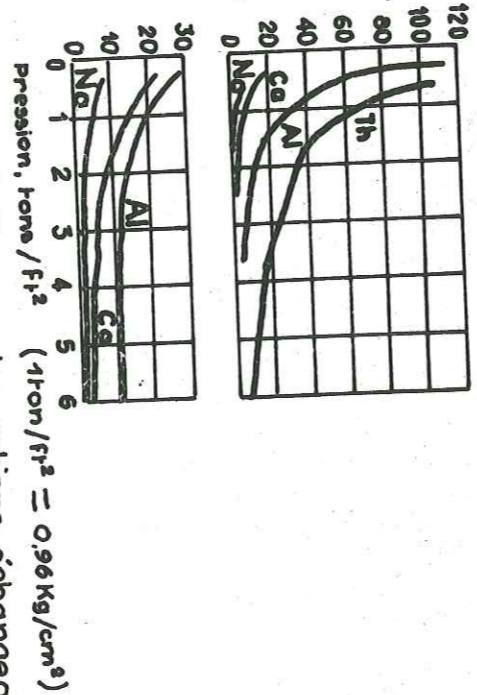


Fig. 29 Influence des cations échangeables sur la perméabilité sous charge de la kaolinite et de la Montmorillonite d'après Samuels (1950)

Gonflement du au gel.

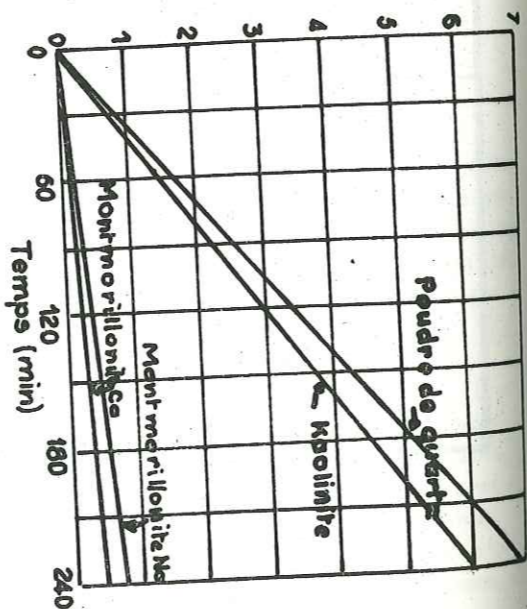


Fig. 30 Relation entre la structure et la composition des argiles et vitesse de gonflement du au gel, d'après Endell (1935 et 1941).

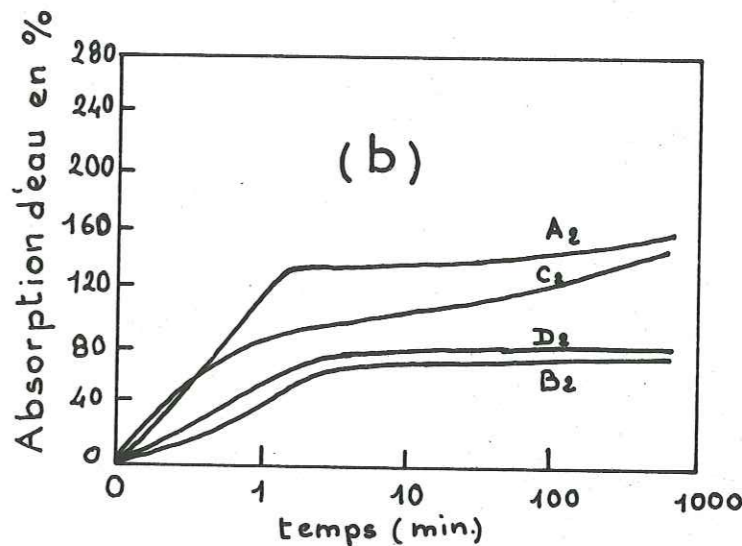
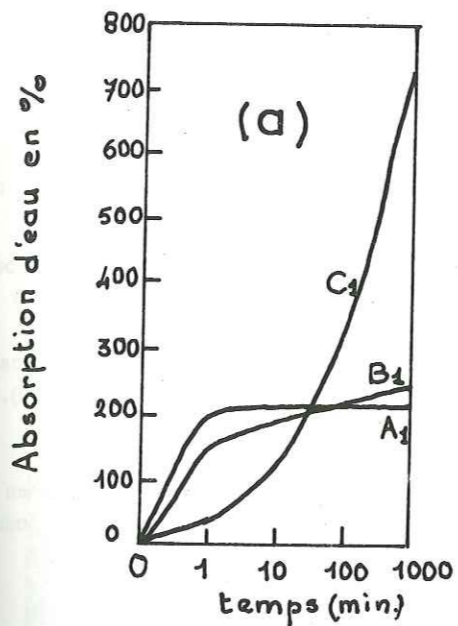
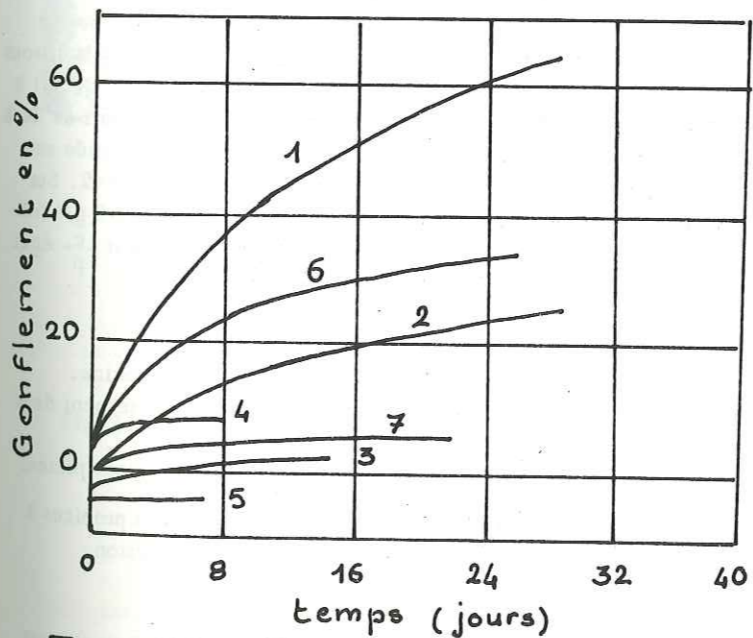


Fig. 32 a-b Courbes d'absorption d'eau pour l'attapulgite (A1) la mont. Ca (B1) la mont. Na (C1) les kaolinites (C2 D2) les illites (A2 B2)



- 1- Montmorillonite Na
- 2- 25% Mont. Na - 75% sable
- 3- 10% Mont. Na - 90% sable
- 4- 10% Kaol. 90% sable
- 5- 25% kaol. 75% sable
- 6- 25% Mont 25% Kaol. 50% sable
- 7- 10% Mont 40% Kaol. 50% sable

Fig. 33 Pourcentage de gonflement pour des mélanges mont. Na.-kaolinite-sable.

y a assez d'eau pour entraîner la liquéfaction de toute la masse. De plus la charge est supportée par un squelette très lâche pouvant se détruire, toute la charge est supportée alors par un matériau mou interstitiel, ayant un pouvoir portant nul ; on passe brutalement d'une bonne résistance à une résistance nulle. Partout où ces argiles sensibles ont pu être reconnues (Canada - Suède - Norvège - Côte Pacifique américaine - secteurs des grands lacs aux U.S.A.) elles donnent lieu à des glissements brusques sans phase prémonitoire, rapides (2 à 3 minutes à Surte en Suède - 15 minutes à Rimouski Québec), sur des pentes variant de 1° à 20° (le plus souvent sur des pentes très faibles). Les glissements prennent des formes particulières (fig. 34) et les volumes mis en jeu peuvent être considérables: 17 500 000 m³ à St-Alban (Québec).

La sensibilité d'une argile dépend de nombreux facteurs : nature des minéraux argileux, teneur en eau, fraction "colloïdale" (ou fraction inférieure à 2 microns); la fraction inférieure à 2 microns ne joue d'ailleurs pas seulement un rôle important dans les argiles sensibles, mais aussi dans toute masse très argileuse plus ou moins homogène que l'on peut rencontrer dans la nature. Un sol riche en colloïdes (peu importe le mécanisme physico-chimique ou mécanique générateur) passera à l'état "solifluidal" dès qu'il pourra se mélanger facilement à l'eau. (voir tableau n° 19).

IV°, 3-3 5 - Importance des sels dissous.

ROSENQUIST en 1946, a étudié quelques "argiles rapides" auxquelles on avait donné une grande sensibilité en supprimant, par "l'échage" les ions sodium sans faire varier la teneur en eau. Le lessivage des ions sodium avait pour effet :

- de supprimer la tendance de l'eau à l'orientation.
- donc de transformer une partie de l'eau adsorbée en eau interstitielle (nous avons vu l'importance de cette transformation).
- d'abaisser la limite de liquidité, mais non la teneur en eau, donc augmentation de l'indice de liquidité.
- d'affaiblir les liaisons entre particules.

Les résultats de ces diverses actions seront :

- une perte de résistance.
- la probabilité d'une rupture brusque des forces de liaison.
- donc un déséquilibre dangereux.

BJERRUM a estimé les effets du lessivage progressif d'une argile marine, (l'eau souterraine bien qu'ayant une vitesse d'écoulement lente, vu la perméabilité faible de l'argile, suffit à faire baisser la concentration en sels dissous de l'eau interstitielle). Le lessivage à Ullensaker fait passer l'argile, d'une concentration originelle de 20 à 30 g/l à la concentration actuelle de 1,2 à 2,9 g/l (moyenne de 2 g/l de Na Cl). La limite de liquidité diminue alors de 34 à 26 %, il y a décroissance de l'activité de minéraux argileux, la résistance au cisaillement de l'argile remaniée est réduite, en conséquence la sensibilité augmente ; à Ullensaker cette sensibilité atteint des valeurs de $\sigma = 42$. Sur un autre glissement, à Bekkelaget, la concentration initiale était de 35 g/l, elle s'est abaissée jusqu'à 2 à 3 g/l (réduction moyenne de 1,5 g/l par siècle). La résistance au cisaillement a été réduite de 30 %, le coefficient $\frac{c}{p}$ égal à 0,20 originellement est tombé à 0,12. Dans le même temps la sensibilité est passée de 8 à 80.

Les conclusions de BJERRUM sont de trois sortes :

- la diminution de concentration en sels provoque un type particulier de glissement en argile marine.
- la baisse de résistance au cisaillement par lessivage cause un accroissement du danger de glissement dans les talus sujets à un écoulement d'eau.
- l'augmentation de la sensibilité fait croître le risque d'élargissement du phénomène à des régions plates.

Nous rappellerons aussi que des concentrations anormales d'ions calcium et surtout magnésium sont propices à la "défloculation" des argiles, transformations dangereuse puisqu'elle s'accompagne d'une perte de cohésion.

IV°, 3-3 6 - Altération des argiles.

Nous laisserons de côté l'altération météorique due aux agents atmosphériques (pluie - gel - dessiccation) pour ne considérer que celle physique et chimique. Il existe en général deux phases :

- désintégration des liaisons intergranulaires ou intermoléculaires provoquant une diminution de la cohésion et de la résistance au cisaillement.

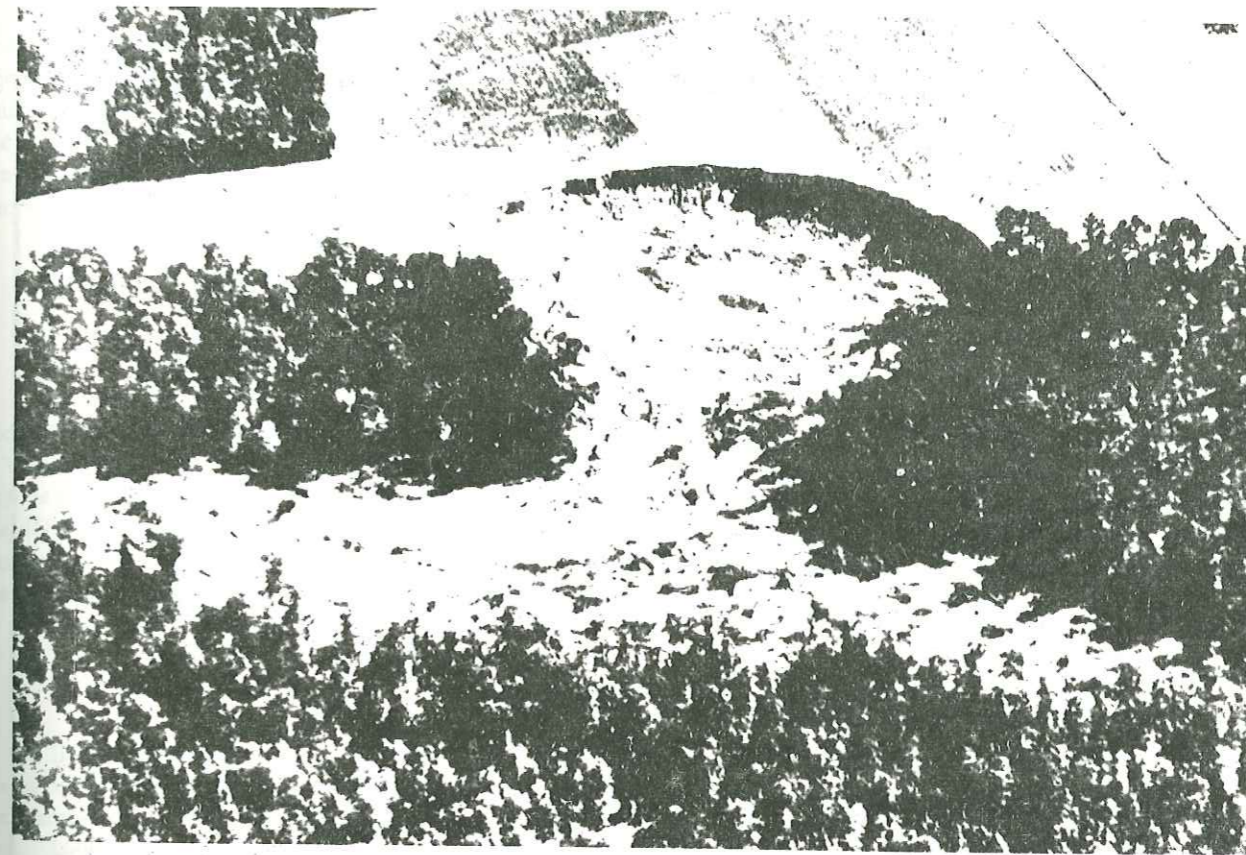


Fig. 34 - Forme courante (en bouteille) des glissements de terrain en argile sensible (étalement soudain - expansion latérale - coulée) ; en général mouvement en deux temps : un premier glissement de taille réduite (glissement initial) puis extension circulaire régressive (glissement principal). Ici, coulée du type earthflow près de Greensboro (U.S.A.) dans un sable argileux du Miocène. (Photo R.H. JORDAN, 1949).

TABLEAU N° 19 - QUELQUES VALEURS DE TROIS DES PARAMETRES CARACTERISTIQUES
DES ARGILES SENSIBLES.

(Ces argiles ont été testées pour la plupart dans des régions de glissements du type étalement soudain ou coulée).

TYPE d'ARGILE (1)	LOCALISATION	FRACTION INF. à 2 μ en %	TENEUR EN EAU en %	SALINITE en g / l
M	RIMOUSKI - Québec	27		
M	Ste-GENEVIEVE - Québec	34		
M	St-ALBAN - Québec	41		
M	OSLO - Norvège	45		
M	PORTLAND - Maine	47		
M	St-THURIBE - Québec	51	44	
M	DYKALLA - Suède	55	58	0,4
M	ANCHORAGE - Alaska	35 à 55	30 à 40	
M	St-STANISLAS - Québec	55		
M	VESTEN - Suède	63 et 65	64	1,1 - 1,2
M	St-VALLIER - Québec	68		
M	NICOLET - Québec	72	53 - 65	5,0 - 9,0
M	ROSERSBERG - Suède	75	59	1,0
F	PORTNEUF - Québec	80		
M	HAWKESBURY - Ontario	82	80	2,3
M	BEAUHARNOIS - Québec		68	0,4
	NASSENA - Ontario		60	0,6 - 2,0
	OTTAWA - Ontario		45-63-80	0,5 - 15,0

(1) - M = Argile marine.

F = Argile d'eau douce.

- une phase d'échanges chimiques et de décomposition des minéraux. Pour des argiles crétacées du bord de la Volga, durant le processus d'altération la pyrite contenue peut être décomposée, le carbonate de calcium attaqué entraînant une diminution du rapport sodium à calcium et magnésium. A travers ces échanges l'épaisseur du film d'eau de liaison décroît et l'argile prend une structure granulaire causant une augmentation de la porosité, de la perméabilité, de la teneur en eau libre ; la cohésion et la résistance au cisaillement diminuent et les glissements ont lieu.

On obtient donc en surface, une couche altérée aux propriétés plastiques anormales et à résistance faible. Ce mécanisme affecte même les argiles préconsolidées, ayant subi au cours de l'histoire géologique des surcharges considérables. La destruction des liaisons est alors assurée en partie par la restitution lente des contraintes emmagasinées au cours de la consolidation. Les argiles les plus dangereuses sont justement celles qui, surconsolidées et possédant des liaisons fortes, sont soumises à une désintégration progressive près de la surface ; 55 % des glissements recensés par L. BJERRUM (1967), ont lieu dans de telles argiles ou marnes, 35 % se déclenchent dans des argiles surconsolidées à faible liaison et 10 % dans des argiles non altérées.

V° - FACTEUR : EAU

D'aucuns connaissent le rôle fondamental joué par l'eau dans les problèmes de stabilité. L'eau est même considérée souvent comme la seule cause réelle des glissements. Nous traiterons ici seulement des influences de l'écoulement souterrain naturel, du ruissellement, des nappes, des infiltrations provoquées par des problèmes posés par les vidanges rapides de retenue de barrages. L'eau sous la forme de précipitations solides ou liquides ainsi que le déficit en eau (sécheresse) seront examinés au paragraphe des paramètres climatiques ; cette division commode est évidemment artificielle, et ne doit pas faire oublier le rôle des précipitations dans les pourcentages d'infiltration, les variations de débits, de niveau, ou l'érosion de surface.

V°, A - EFFETS DE L'ECOULEMENT NATUREL DES EAUX INFILTREES.

Ils représentent l'impossibilité dans laquelle se trouve l'homme de connaître les conditions régnant dans le talus ou le versant et plus particulièrement celles ayant trait à l'eau. Ceci justifiera d'ailleurs les principes de recherches et de connaissances des conditions hydrogéologiques que nous énoncerons dans des chapitres suivants.

L'eau s'infiltrant à la suite de pluies, du ruissellement, ou de mouvements de nappes, à l'intérieur d'un versant et s'écoulant dans un sol se traduit selon J. FLORENTIN par une "force massique" (d'autres l'appellent aussi pression de filtration), "dirigée suivant le sens de l'écoulement et dont l'intensité pour un élément de volume dV est égale à $i dV$; i étant le gradient hydraulique ou la perte de charge unitaire de l'écoulement".

Si nous considérons un élément de plan (fig. 35) petit, limité par deux lignes de courant distantes de "da" et de deux lignes équipotentiels distantes de "db" ; si h et h - dh représentent les charges hydrauliques sur les deux équipotentiels, les forces dues à l'eau sont la résultante générale s'exerçant sur les faces de l'élément défini ; cette résultante s'écrit $d\vec{I} = e \cdot i \cdot dV$ où e = densité de l'eau.

Suivant son orientation, la force massive développée par l'écoulement peut être plus ou moins défavorable. L'orientation des lignes de courant est variable du sommet à la base du versant, nous examinerons le cas très théorique d'un talus construit dans du sable.

On peut distinguer dans un tel talus trois orientations principales des lignes de courant :

- un écoulement vertical (fig. 36a) correspondant à la zone sommitale ou zone d'infiltration ; l'angle représentant l'inclinaison des équipotentiels sur la normale du talus est considéré comme négatif et l'écoulement se fait vers l'intérieur du talus. En principe pour une telle orientation l'angle d'équilibre ne doit pas être influencé par l'écoulement et conserve la même valeur que dans un talus de sable sec.

- un écoulement horizontal (fig. 36c) en pied de talus, les lignes de courant ont tendance à remonter et à ressortir du talus, l'angle des équipotentiels est considéré alors comme positif. Une telle orientation caractérise les zones de résurgences ou de suintement, l'équilibre se détériore rapidement et le sable peut devenir

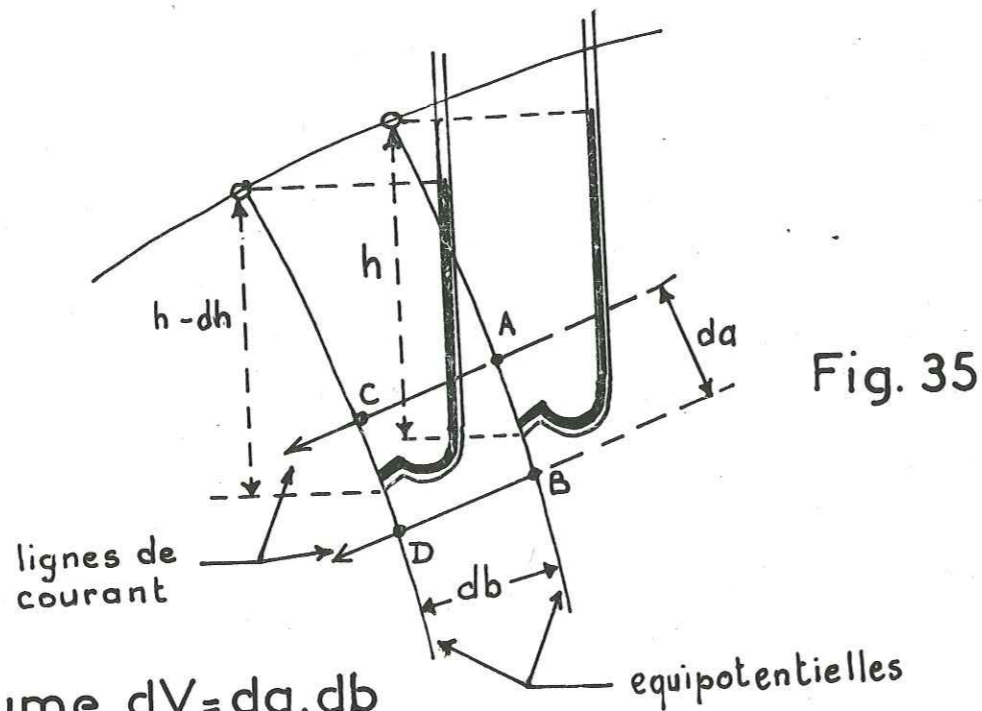


Fig. 35

Volume $dV = da \cdot db$
 Ecoulement $d\bar{l} = \gamma_e \cdot i \cdot dv$

γ_e = densité de l'eau
 γ_s = densité du matériau

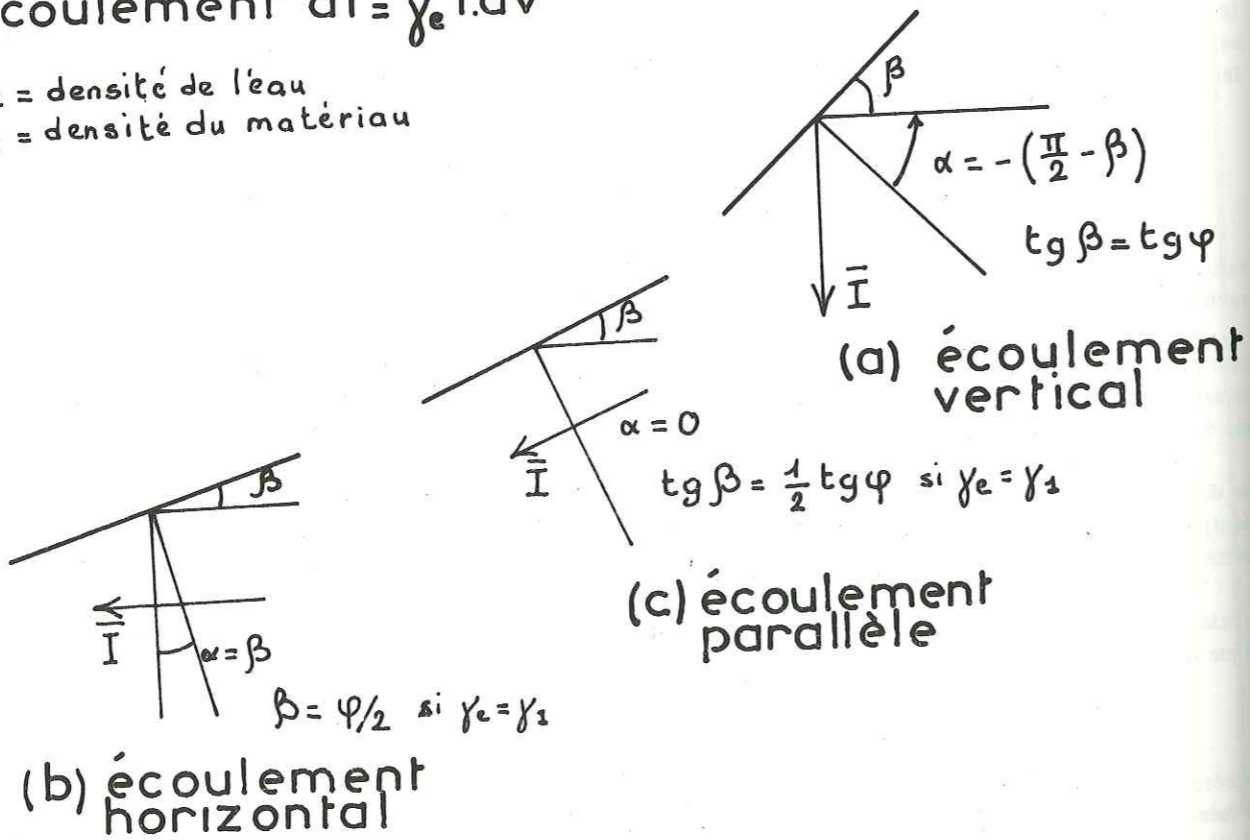


Fig 36 a-b-c Orientation des lignes de courant dans un talus homogène (J.FLORENTIN)

boulant ; la pente de stabilité sera très faible, voire nulle.

- un écoulement parallèle caractérisant la zone intermédiaire entre le sommet et le pied de talus, où les lignes de courant passent progressivement de la verticale à l'horizontale (fig. 36b).

La pente d'un tel talus, soumise à la circulation des eaux, sera donc plus raide vers le sommet et plus faible vers la base. De plus le sommet travaille en traction permettant ainsi l'infiltration et la base travaille à la compression tendant ainsi à s'opposer à la sortie de l'eau, en refermant les fissures, et à créer des sous-pressions préjudiciables à la stabilité du talus. Ces résultats d'après FLORENTIN doivent être étendus aux talus argileux, où la tranche supérieure fissurée est susceptible de recueillir une certaine quantité d'eau.

Mais le cas exposé correspond à un talus idéal dans un matériau homogène. Or la nature ne permet pas en règle générale un écoulement aussi parfait.

Dans un versant la présence de lentilles perméables ou imperméables, de failles, de talwegs enterrés peut en effet changer entièrement des lignes d'écoulement et les rendre discontinues.

L'existence d'un substratum imperméable, peu profond, conditionne un écoulement parallèle dans la majeure partie du versant qui est très préjudiciable à la stabilité de la couche de couverture, ce substratum jouant le rôle de "glissoir" et ce, d'autant plus, que la zone de contact aura perdu une grande partie de sa cohésion du fait de la saturation.

V°, B - LE RUISSELLEMENT DE SURFACE.

Le ruissellement provoque l'ameublissement, la saturation rapide des matériaux et surtout une érosion continue et intense.

V°, B 1 - Importance des crues.

Les torrents, lors de leurs crues, apportent les quantités d'eau nécessaires à la saturation rapide des matériaux, leur faisant atteindre, dans des délais très courts, des teneurs en eau élevées, capables de les faire passer de l'état "solifluidal". La plupart des coulées de type earthflow ou mudflow doivent leur déclenchement à des crues torrentielles, en tenant compte toutefois des conditions particulières de nature, de perméabilité, de porosité, de fracturation des terrains affectés. Les crues des torrents savoyards sont à cet égard significatives et ont contribué, d'une part sous l'effet de la force d'érosion au mouvement initial, et d'autre part à la répétition des coulées qui obstruaient plus ou moins leurs lits.

Les crues du torrent de Pontamafrey : la Ravoire, sont tristement célèbres depuis celles du 12 août 1732 jusqu'à celles récentes des 20 mai, 3, 4, 5, 6 juin et 8, 9 juillet 1965, aboutissant à des "laves" (mudflow) épaisses dues à la liquéfaction des matériaux du glissement de la crête des Coins (Coin du Chatel) sur la rive gauche.

V°, B 2 - Affouillement et érosion.

L'affouillement, lent et constant, ou brutal et intense, des berges de torrents et de rivières aboutit souvent à la formation de glissements de différents types : coulées, solifluxion, écroulement, glissement de débris.

- les cours d'eau subséquents, actifs, favorisent par leur pouvoir d'affouillement latéral, le départ de coulées du type earthflow. Certains terrains stables ou considérés comme tels, entaillés profondément par un réseau hydrographique donné présentent autant de coulées qu'il y a de talwegs actifs et d'affluents.

- Les cours d'eau principaux façonnent les versants de plusieurs manières.

L'érosion latérale du pied de versant, provoquant un affouillement continu, se solde, lors de crues importantes, par des catastrophes. Le résultat des crues de juin 1957 sur le Guil, l'Ubaye, la Serveyrette ou celles d'octobre 1960 dans le Massif Central se traduisent dans certains endroits d'après TRICART par de "véritables plaies morphologiques" les versants étant mis à vif ; la crue de 1960 a provoqué en quelques heures l'apparition de griffures et déchirures accompagnées de coulées dans des versants au relief mou et considérés comme stables auparavant.

L'érosion violente et localisée des cours d'eau sinueux (à petit et grand rayon de courbure) contribue aussi et d'une manière plus spectaculaire à raidir les pentes des berges jusqu'à la rupture finale, ou à supprimer brutalement

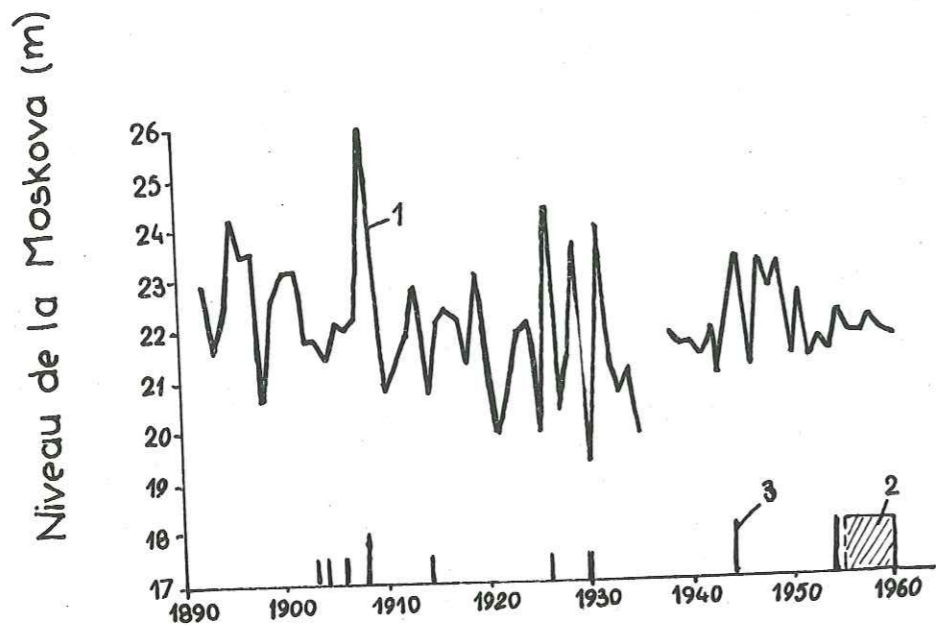


Fig. 37 Graphique de la hauteur des grandes crues de la Moskova (région de la digue de Bab'egorod) et glissements de terrains enregistrés sur les Monts Lénines d'après V.V. KJUNTCEL'.

- 1 - Niveau de la Moskova.
- 2 - Mouvements de glissements lents, non éteints.
- 3 - Glissements enregistrés dans les Monts Lénine.

Masses de terres remblayées (m³) Masses de terres érodées (m³)

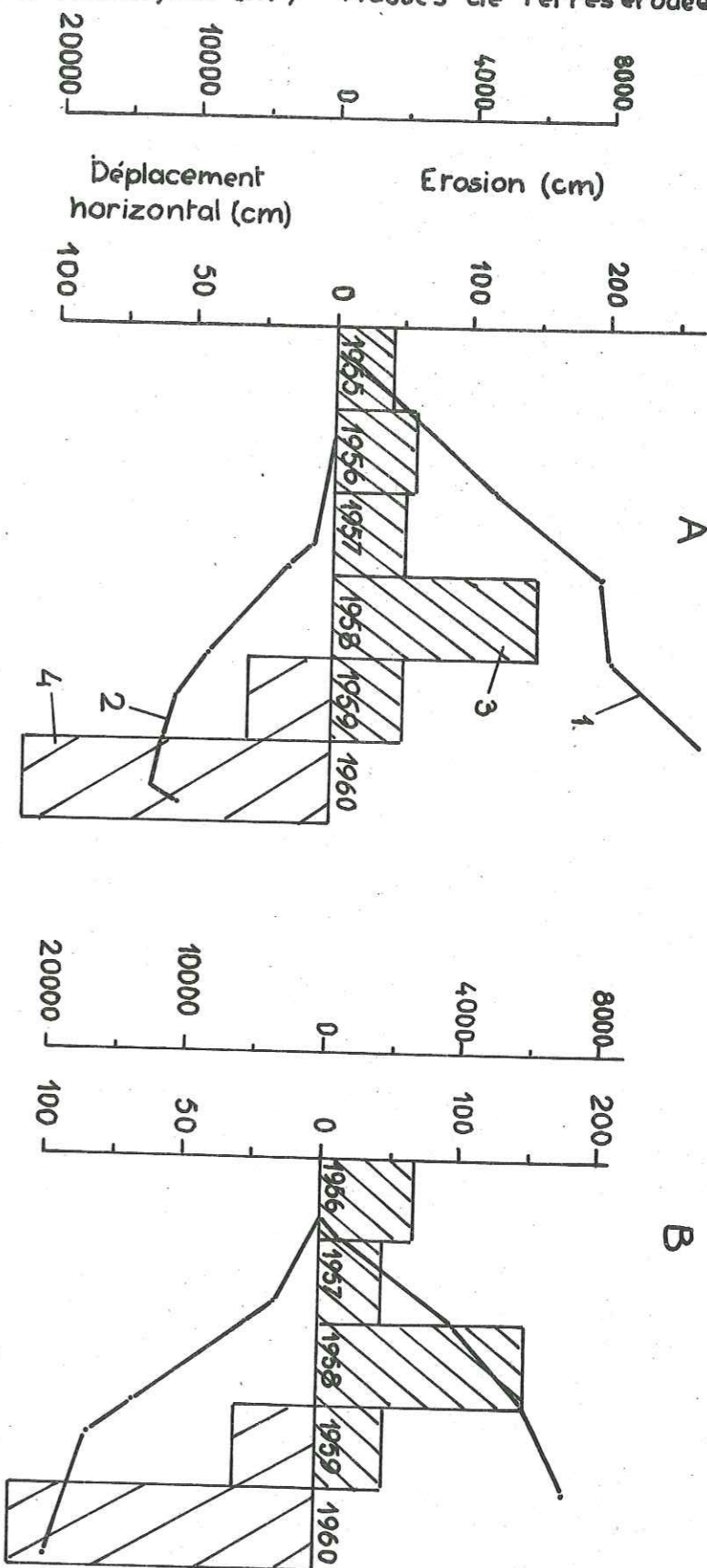


Fig. 38a-b : Graphiques de l'érosion de la berge par la rivière et des glissements liés à cette érosion, d'après V.V. KJUNTCEL'.

A - B : secteurs différents. - 1. valeur de l'érosion de la berge - 2. valeur du déplacement horizontal du glissement - 3. volume des terres érodées - 4. volume des masses de terre remblayées.

la butée de pied. Les géologues de la station russe d'études de glissements à Moscou effectuent des observations détaillées sur l'érosion des berges de la Moscova le long des Monts Lénine. L'érosion est intense pendant les grandes crues d'automne, et a provoqué, certaines années, d'importants glissements de terrain dans les argiles des berges. L'un des plus considérables (en 1908) sur les Monts Lénine dans le domaine de l'ancien Yacht Club est en rapport vraisemblablement avec la grande crue de cette année-là, qui a atteint 10,5 m de hauteur (voir figure 37) ; d'autres ont été repérés et observés en 1954 sur un front de 380 m et en 1957 sur 800 m (glissements lents). Deux graphiques (fig. 38a - b) montrent que l'intensification de l'érosion provoque l'accélération des mouvements ; dans le cas du glissement A, les déplacements entre 1957 et 1958 ont été de 40 cm, le bilan des terres glissées est d'ailleurs plus fort que celui de l'érosion propre.

Quand une vague d'érosion régressive part du fond de la vallée principale, elle se répercute sur les torrents affluents, la pente des diverses sections du torrent ne sera plus la même et son profil longitudinal sera très irrégulier. Au Chatelard (Savoie) l'érosion a approfondi la gorge, et le secteur en pente raide a gagné l'amont, il a fini par mordre dans les formations glaciaires meubles du Mont Julioz. L'enfoncement du talweg s'est fait rapidement dans les roches moins dures, les versants deviennent très raides et atteignent la valeur de la pente limite d'équilibre ; il suffit d'une faible augmentation de la teneur en eau par suite de la fonte de neige pour causer la rupture finale.

Un torrent façonne la pente en fonction des influences lithologiques et de l'enfoncement saccadé de son niveau de base. Dans des formations tendres une vague d'érosion assez puissante suffit à faire dépasser la valeur de la pente d'équilibre et les déchirures, décollements, coulées apparaissent. La ou les coulées continuent à fonctionner par saccades jusqu'à ce que les pentes aient atteint à nouveau leur valeur d'équilibre.

V°, C - NAPPES.

La montée du niveau piézométrique a deux conséquences principales :

- augmentation de la pression interstitielle.
- diminution de la cohésion.

Dans une couche saturée soit de sable soit de silt, la résistance au cisaillement peut s'écrire de la façon suivante :

$$S = (p - hW) \tan \psi$$

p = pression par unité de surface en un point donné de la surface de glissement potentielle.

h = charge piézométrique.

W = poids de l'eau.

ψ = angle de frottement interne, sur la surface de glissement potentielle.

S'il y a cohésion :

$$S = C + (p - hW) \tan \psi$$

Donc quand le niveau piézométrique h monte, la résistance au cisaillement S diminue.

De nombreux auteurs ont observé et contrôlé l'accélération des vitesses de déplacement en fonction des variations de niveau des nappes. C'est le cas du glissement du village Okimi au Japon où les vitesses de déplacement commencent à croître dès que le niveau de la nappe phréatique arrive à 1,76 m du sol (fig. 39). K. TERZAGHI a observé des choses similaires dans une région tropicale où il y a glissement d'une couche de terrain métamorphique de 40 m d'épaisseur dès que la nappe atteint la cote de 5 m sous la surface du sol (fig. 40).

Si la nappe est captive ou se met en pression par suite de tassement en surface ou de coulées argileuses, obstruant ainsi les sorties possibles de l'eau, la stabilité du versant peut être mise en danger.

- Les sous-pressions augmentant, il arrivera un moment où l'obstacle sera rompu et il se produira alors une véritable éruption de l'eau transformant le glissement, rapidement, sinon instantanément, en coulée ; la violence et la soudaineté du processus fait croire souvent aux témoins qu'il s'agit de la rupture de véritables "poches d'eau souterraines". J. STINI a étudié ces phénomènes dans les Alpes Autrichiennes et parle d'ailleurs "d'effets explosifs de l'eau". Un certain nombre de glissements ont eu lieu en 1930 sur la colline de Fourvière, répondant sensiblement à ce processus ; les débouchés des différents niveaux aquifères et, en

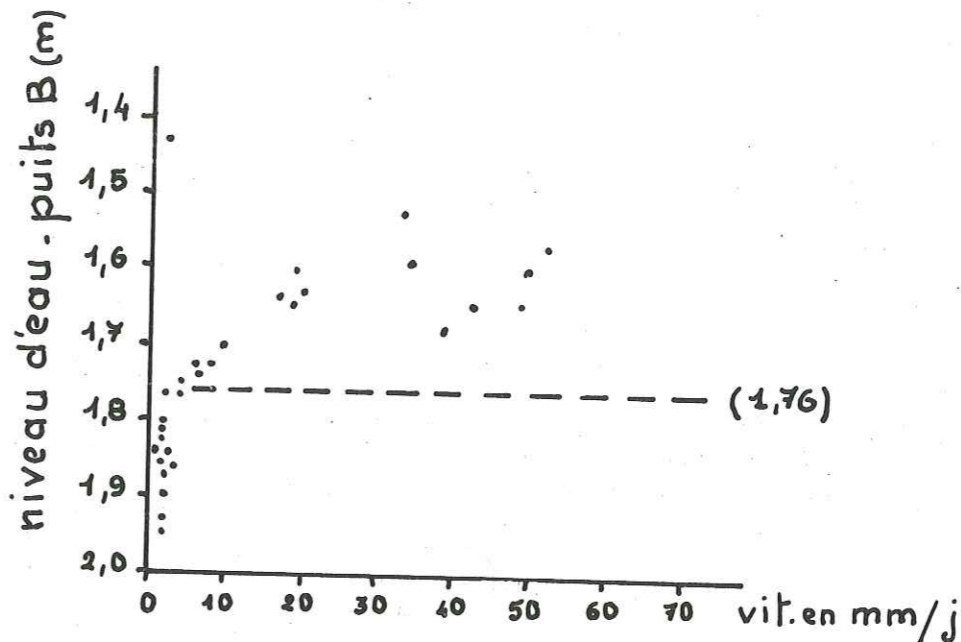


Fig 39 Influence du niveau d'eau sur les mouvements de terrain dans la région de Kamiya Japon d'après T. TANIGUCHI.

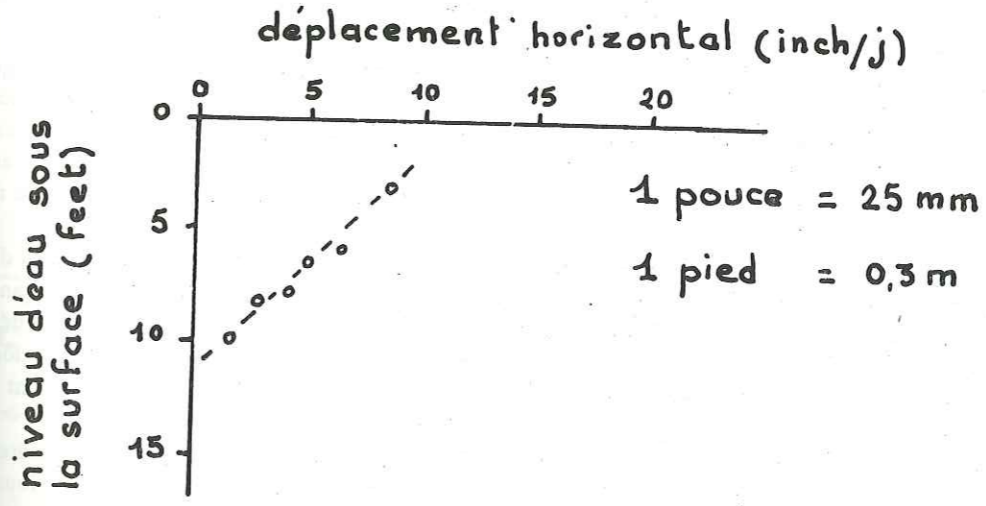


Fig 40 Relation entre la position de la nappe sous la surface et les déplacements horizontaux. d'après K. TERZAGHI. (Le remède consiste à maintenir le niveau de la nappe à quatre mètres sous la surface)

particulier, de ceux du Pliocène graveleux, obstrués par le fluvio-glaciaire argileux, ont permis une mise en pression de l'eau.

- Dans le cas de nappe captive, le toit argileux imperméable peut gonfler et se mettre en mouvement sous la pression exercée par l'eau. Nous pensons que ce phénomène n'est pas étranger aux désordres affectant la R.N. 85 Grenoble - Gap, à l'entrée du village de Corps où la couche argileuse de surface soliflue. Nous manquons malheureusement de relevés topographiques contrôlant les déplacements lors de la mise en charge de la nappe.

V°, D - INFILTRATIONS PROVOQUES.

Les plus grandes sources d'infiltration et les plus néfastes sont celles dues à l'intervention humaine : fuites de retenue de barrages, fuites de galeries de mise en pression, canaux non étanches, égouts en mauvais état, caniveaux collecteurs des voies de communication, cassés, inexistantes, non étanches (Corps), irrigation par ruissellement (Beaumont).

Quand l'eau s'échappe d'un réservoir formé par un barrage en béton, la pression hydrostatique la plus grande se développe dans les fissures à la base du talus en aval du pied du barrage et peut provoquer un effondrement du talus. Les effets d'un tel glissement sur la stabilité du barrage dépendent plus ou moins du type de barrage (nous excluons ici l'hypothèse de la digue en terre). Un glissement serait pratiquement inconsequent d'après TERZAGHI pour un barrage poids, "une fente de glissement produite par un effondrement au pied du talus est située entièrement en aval du pied de barrage, et la distance entre la fente et le bord aval de la base du barrage augmente rapidement avec la hauteur au-dessus du fond de la vallée." Si l'on a affaire à une voûte, les effets de la pression interstitielle d'eau, combinés à ceux, produits par la poussée de la voûte, qui a une composante dans la direction aval, tendent à pousser la roche en dehors du talus. Et si un arrachement a lieu dans la roche supportant le barrage les conséquences seront catastrophiques (barrage de Malpasset).

J. STINI (1956) a étudié les conséquences possibles d'infiltrations d'eau en provenance de galeries en charge. Sur le figure 41 sont représentées la position d'un barrage voûte, haut de 52 m (A) et la galerie en charge (A-B-C) d'une longueur de 3 km, d'un diamètre de 3,60 m et revêtue, conduisant aux réservoirs de suppression. Cette galerie est construite dans une roche stratifiée, métamorphique, plissée, d'origine sédimentaire. En B et C l'eau franchit les petites vallées par l'intermédiaire d'une conduite en acier de diamètre intérieur de 3,60 m se raccordant sur une distance de 10 m avec la galerie. Au-delà des extrémités du tuyau en acier le tunnel est revêtu d'une chape en ciment et les espaces libres chape - rochers sont comblés avec du béton. La galerie passe sous une hauteur de rocher de 40 m maximum.

Le réservoir est rempli pour la première fois au printemps 1953. En janvier 1954, une source s'échappa d'une fissure de la roche au point C 1 (fig. 41) avec un débit de 1 m³/s. n'occasionna pas de glissement important et fut maîtrisée. En décembre 1954, le talus près de l'entrée C 2 laisse sortir du côté nord une source, dont le débit augmenta rapidement jusqu'à 28 m³/s., et qui produisit un glissement de 20 000 m³ environ (les plus gros blocs déplacés pesaient 13 tonnes). Le glissement démolit le tuyau et le revêtement adjacent, la semelle supportant l'extrémité de la galerie se souleva de 20 cm et avança d'environ 25 cm vers la vallée.

La figure 42 montre une section suivant l'axe de la galerie à l'endroit du glissement. Les plans de fissures sont inverses et plongent vers le talus avec un angle de 40° et la roche est en plus, subdivisée par des fissures orientées perpendiculairement aux plans. A proximité de l'extrémité aval de la conduite forcée, le tunnel passe des gneiss durs à des schistes fracturés, terrain dans lequel ont été observées des chutes de la voûte pendant la construction ; les cavités résultantes furent bétonnées. L'eau qui produisit le glissement sortit probablement par la fente a - b (fig. 42) dans la partie renforcée où l'on avait déjà observé une chute de la voûte. A l'endroit de la fente la profondeur du rocher était inférieure à 80 % de Hc (Hc = profondeur du rocher au-dessus de la galerie mesurée perpendiculairement à la surface du sol) nécessaire d'après les équations pour éviter un soulèvement. La largeur des fissures et la quantité d'eau s'échappant de la galerie augmentèrent rapidement et le talus se mit à glisser.

La pression d'eau varie avec les saisons et la roche située au-dessus de la galerie est compressible. Les efforts dans le revêtement augmentent et favorisent l'ouverture de fissures. De plus, au moment du glissement, en décembre,

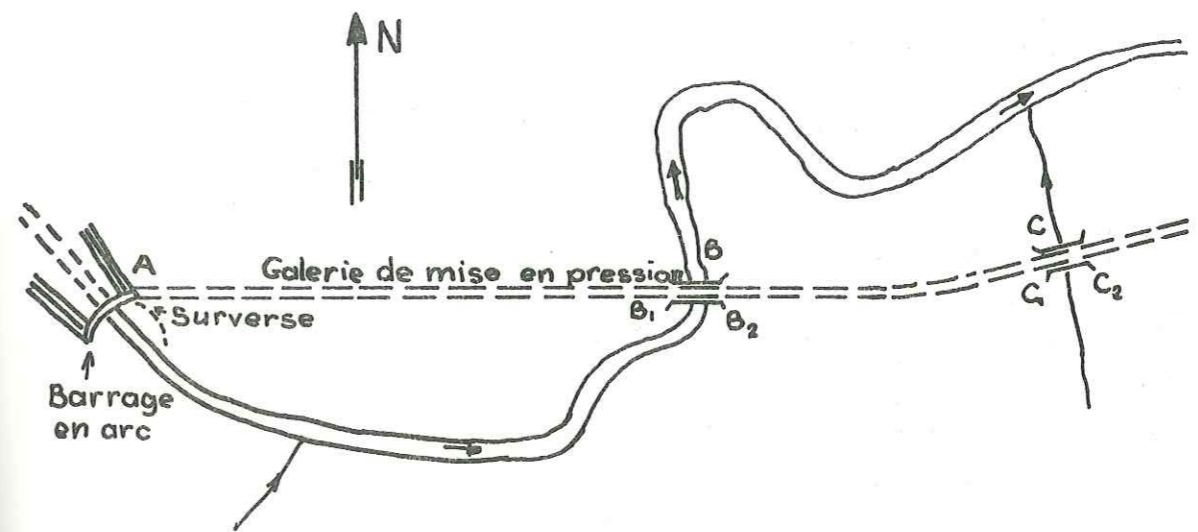


Fig. 41 Plan de situation de la galerie de mise en charge. (J. STINI 1956)

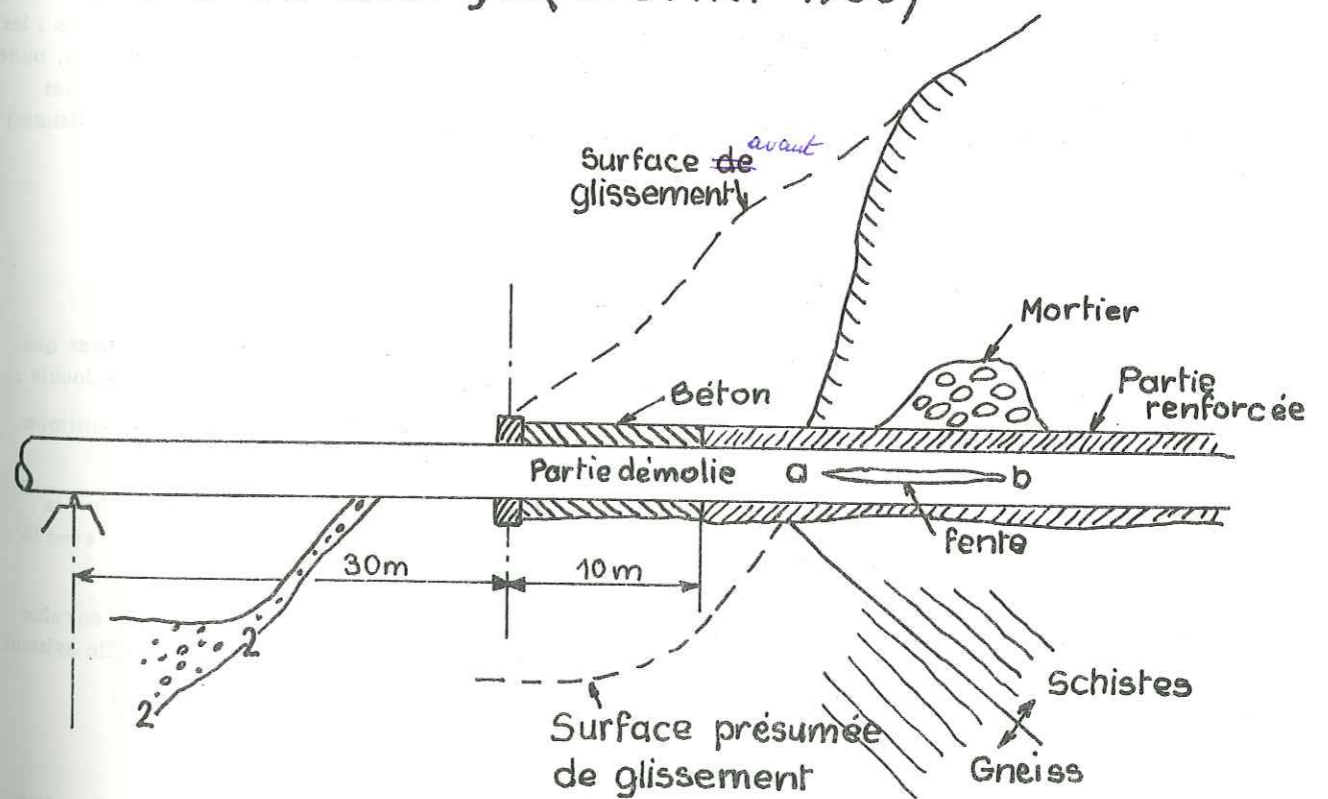


Fig. 42 Glissement en C 2

les sorties des joints étaient sans doute obturées par la glace, si bien que les pressions de l'eau accumulée derrière la pente et les pressions filtration augmentèrent.

Ainsi l'histoire du glissement en C 2 illustre un des nombreux processus qui peuvent se terminer par une fuite catastrophique à travers le revêtement "étanche".

Tous les glissements de ce genre ont un point commun. L'eau, qui s'échappe de la galerie, envahit les fissures de la roche entourant le tunnel, elle soulève la roche comme un vérin hydraulique, puis la quantité d'eau augmente et le glissement se produit. Pour pouvoir soulever la roche les pressions doivent être plus grandes que le poids de la roche située au-dessus. Selon TERZAGHI, la condition la plus défavorable se développe si l'eau entre dans un joint ou un ensemble de joints plus ou moins parallèle à la surface du sol.

Si Hc = profondeur du rocher au-dessous du tunnel mesurée perpendiculairement à la surface du sol.

H = pression hydrostatique de l'eau dans la galerie.

W_r = poids spécifique du rocher.

W = poids spécifique de l'eau.

le rocher situé au-dessus du joint se soulèvera à moins que Hc soit égal ou supérieur à :

$$Hc' = \frac{H \cdot W}{W_r}$$

Si W = 1 000 Kg/m³ et W_r = 2 600 Kg/m³ Hc' = 0,385 H

Cette règle est connue depuis longtemps, c'est pourquoi on donne une ligne au-dessus de laquelle la profondeur de couverture Hc est inférieure à H/2

$$Hc = \frac{H}{2} \text{ ce qui correspond à un coefficient de sécurité } F_s = 1,3.$$

Les résultats peuvent être tout aussi catastrophiques dans le cas de galeries, de conduites à écoulement libre ; les divers glissements et coulées affectant le canal du Drac dans la région du col Bayard sont vraisemblablement dus, outre la pluviométrie, aux infiltrations en provenance de la galerie des Serrigues et du passage sous buse. La galerie des Nivouls construite à la suite du glissement de 1936 se trouve d'ailleurs dans un état très médiocre (nombreuses fissures) et laisse présager des ennuis futurs.

V°, E - VIDANGE RAPIDE DE RETENUE DE BARRAGE

On a enregistré un nombre suffisant de rupture de barrage en terre (1), lors de vidange rapide pour prouver que ce processus peut être néfaste à la stabilité d'une digue (voir tableau n° 20). L'effet d'une vidange rapide est double :

- elle modifie les conditions aux limites de l'écoulement de l'eau à travers la digue, un régime transitoire s'établit et la surface piézométrique s'adapte à la nouvelle condition.
- les variations de contraintes, dues à la vidange, provoquent des variations de pression interstitielle ; la distribution critique s'établit juste après la vidange, ensuite les pressions interstitielles diminuent avec le temps et le coefficient de sécurité de la pente amont augmentera.

De plus dans les matériaux à faible perméabilité, la modification de charge, au cours de la vidange, entraîne des variations des contraintes de cisaillement influant aussi sur la valeur de la pression interstitielle résiduelle existant après la vidange. N. MORGENSTERN (1963) a conçu des abaques de stabilité mettant en relation (fig. 43) :

- la pente du parement amont,
- l'angle de frottement interne avec des valeurs de φ' = 20°, 30°, 40°,
- le rapport sans dimension $\frac{c'}{\gamma H}$ où c' = la cohésion apparente ; γ = le poids spécifique du sol ; H = la hauteur dans une section du niveau de la fondation à la crête,
- le facteur de vidange $\frac{L}{H}$ où L = la distance du niveau de crête du barrage au niveau de vidange.

(1) - Ces types de ruptures ont été décrits par MAYER (1936) ; SCHATZ et BOESTEN (1946) ; REINIUS (1948) ; SHERARD (1953) ; BISCHOP (1952) ; MORGENSTERN (1960) ; PATON et SEMPLE (1960)

TABEAU N° 20 - QUELQUES CAS DE RUPTURE DE BARRAGE EN TERRE LORS DE VIDANGE.

NOM	HAUTEUR (m)	PENTE AMONT	CARACTERISTIQUES DES SOLS	REMARQUES
CERCEY	11,5	2,4/1	c' = 0,2 bar φ' = 26°	Essais drainés à la suite de cisaillement effectués plusieurs années après la rupture MAYER (1936)
WASSY	16,5	1,5/1	c' = 0,195 bar φ' = 23°	idem
GROBOIS	17,4	1,9/1	c' = 0,250 bar φ' = 25,7°	idem
CHARMES	17,0	1,9/1	c' = 0,280 bar φ' = 26,6°	idem
BEAR GULCH	19,2	3/1	--	SHERARD (1953)
BELLE FOURCHE	37,2	2/1	c = 0,545 bar φ = 9,7°	Essais de cisaillement directs, non drainés, après rupture. SHERARD (1953).
BRUSH HOLLOW	22,3	3/1	c _u = 0,920 à 1,450 bar	Essais de compression simple après rupture. SHERARD (1953).
ALAI - IKE	13,0	1/1 ; 2/1	c' = 0,100 bar φ' = 18°	Essais triaxiaux consolidés non drainés. AKAI (1958).
EILDON	27,4	1,35/1	---	SCHATZ et BOESTEN (1936)

Une brusque vidange peut également provoquer des glissements sur les pentes naturelles de la retenue d'autant plus dangereux que la retenue sera plus profonde et la montagne plus élevée.

JONES, EMBODY et PETERSON (1961) ont noté que les glissements de rive du lac Franklin D. Roosevelt sont plus nombreux après un abaissement du niveau de l'eau retenue par le barrage "Grand Coulée". Ils ont dénombré environ 500 glissements entre 1941 et 1963 (voir figure 44).

Les mouvements de terrain sont essentiellement de trois types :

- des "slumps earthflows" ;
- glissements de débris ;
- coulées du type mudflow.

Ces glissements ont lieu dans des sédiments pléistocènes de types divers suivant le pourcentage d'argile et celui de sable et gravier, reposant sur un substratum granitique, basaltique ou métamorphique.

Les terrasses affectées ont des hauteurs variant entre 0 et 150 m avec des pentes de 1/1 à 1/5 et un pourcentage de submersion variant de 0 % à plus de 75 %.

Un exemple illustrant les effets d'une vidange rapide est celui du glissement de roches catastrophique de Vajont Longarone le 9 octobre 1963.

a) Les caractéristiques du barrage et de la retenue sont les suivantes :

- Barrage voûte à double courbure, avec joint périmétral.
- Hauteur maximale : 261,60.
- Longueur en crête : 190,15 m.
- Epaisseur maximale en clé (cote 470) : 22,11 m.
- Epaisseur minimale en clé (cote 724,50) : 2,92 m.
- Consolidation des appuis par des ancrages.
- Volume total de béton : 360 000 m³
- Niveau maximal prévu de la retenue : 722,50 m.
- Capacité de la retenue : 168 000 000 m³
- Première mise en eau : mars 1960.

b) Caractéristiques géologiques du site.

- Le barrage est implanté sur des calcaires en gros bancs, mais assez diaclasés, formant des falaises abruptes, à l'aval de l'ouvrage et à pendage 15° N.E. environ dans cette zone. Ce pendage se relève vers l'arrière du versant jusqu'à des valeurs de 40°. Le pendage est conforme à la pente topographique. Ces calcaires constituent le Dogger (Jurassique moyen).
- Les calcaires du Dogger sont surmontés par des calcaires en plaquettes verts et violets, à surface satinée de quelques dizaines de mètres (50 m environ) en bancs de 10 à 20 cm, Im. maximum. Ces calcaires du Malm (Jurassique supérieur) sont ondulés et contiennent la surface de glissement général. Ils sont encore visibles dans la pente glissée ainsi que les petits plis les affectant, dont les charnières n'ont pas toute été décapitées par le glissement.
- Au-dessus viennent le Crétacé inférieur et moyen avec des calcaires blancs à passées rouges en bancs de 10 cm à 2 m.
- Enfin, le tout est recouvert par les marnes grises et rouges très plissées du Crétacé supérieur.
- Le glaciaire est peu épais, 1 à 2 m.

La vallée du Vajont est installée dans un synclinal E. W., limité au Nord par le chevauchement du Mont Borga et au Sud par l'accident du Mont Toc ; il existe en outre de nombreuses cassures, obliques, dans les pentes du Mont Toc. Certaines de ces cassures ont été retrouvées en sondage.

c) Fréquence régionale des glissements.

Il existe de nombreux glissements de roche du type Vajont dans la région Vittorio Veneto, Longarone, Rovereto (glissement de Fadalto entre le lac Santa Croce et le lac Morto, ce dernier est d'ailleurs plus important que celui du Vajont).

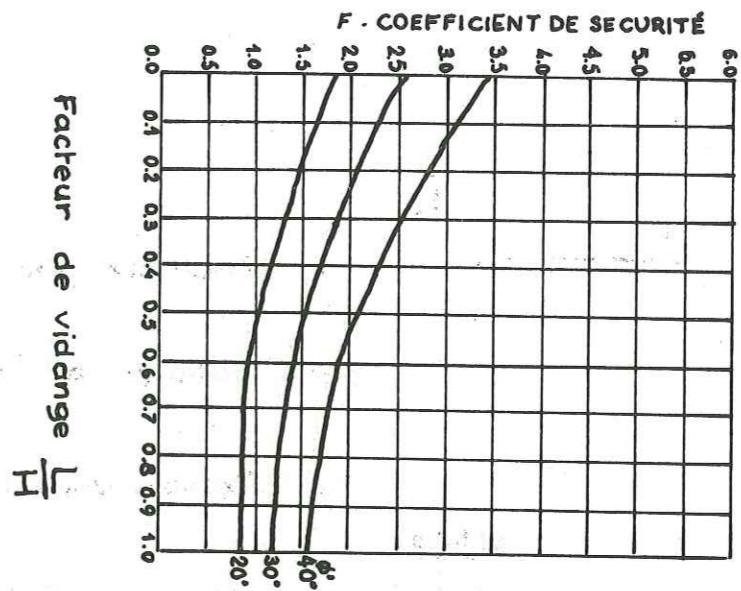
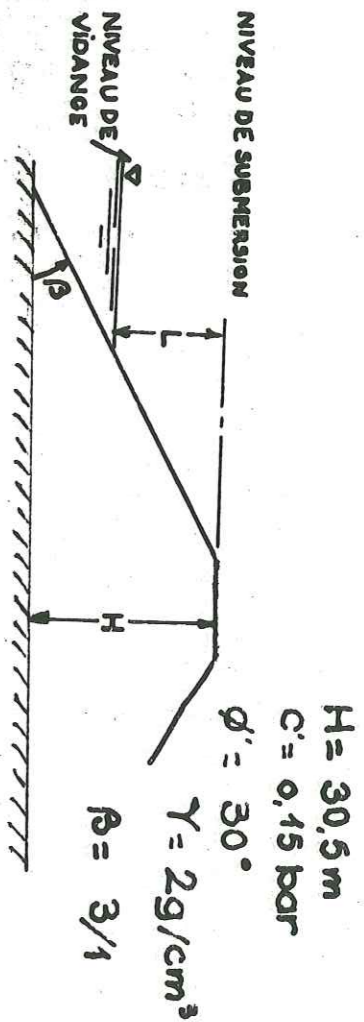


Fig. 43: Aboque de stabilité à la vidange pour $\frac{L}{H} = 0,025$ d'après N. MORGENSTERN (1963)

Pour une vidange complète
 $\frac{C'}{\gamma H} = 0,025$ $\gamma' = 30^\circ$ $\frac{L}{H} = 1$
 le coefficient de sécurité $F = 1,20$
 le cercle critique est tangent à la base du barrage.



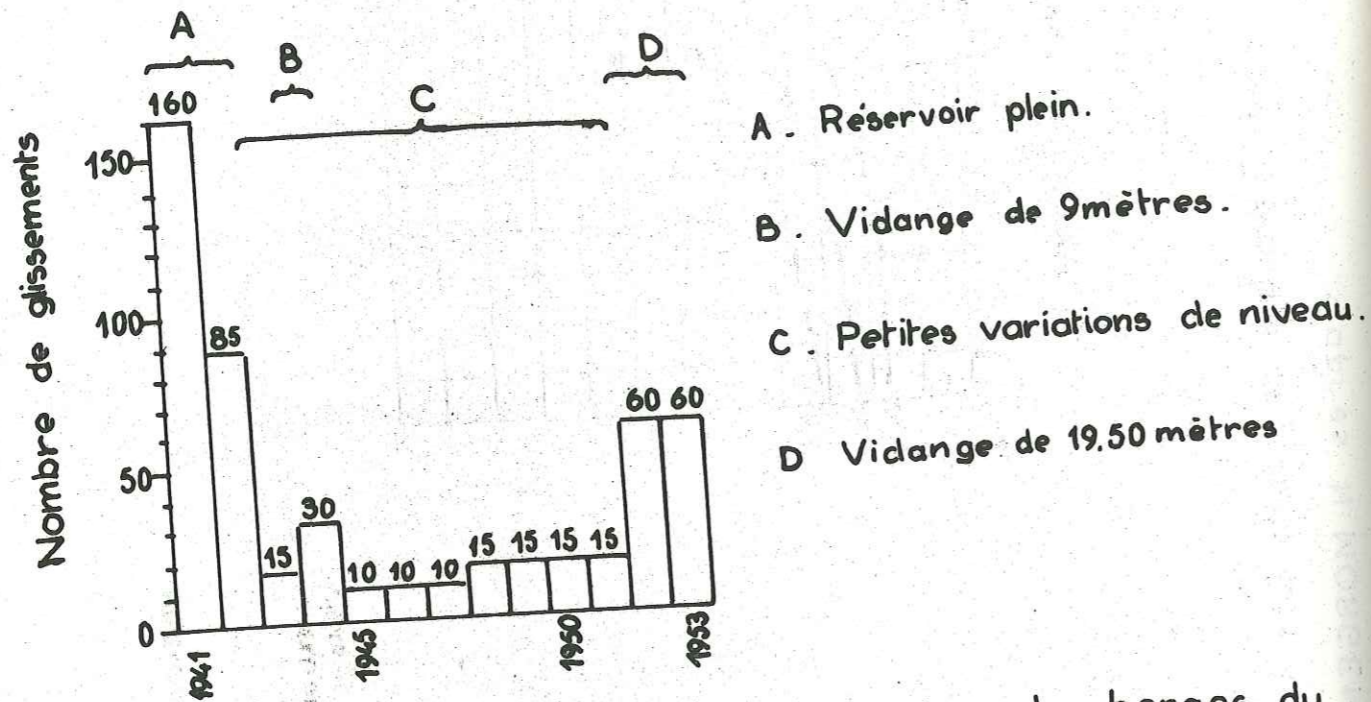


Fig. 44 : Fréquence de glissements dans les berges du lac Franklin D. Roosevelt (1941 à 1954).

1934	11	glissements
1935	16	"
1936	9	"
1937	21	"
1938	5	"
1939	11	"
1940	6	"
1941	1	"
1942	4	"
1943	2	"
1944	0	"
1945	0	"
1946	2	"
1947	1	"
1948	3	"
1949	1	"
1950	7	"
1951	3	"

Fouilles et construction - dérivation nombreuses de la rivière avec variations de niveau.

Construction - variations moins nombreuses qu'en 1934 - 1937.

Variations de niveau de la rivière peu importantes.

Augmentation des variations de niveau de la rivière, à la suite de l'aménagement du barrage Grand Coulée - Crue de la rivière Columbia en 1948.

Quelques autres barrages aux environs de Longarone ont eu aussi leurs glissements et leurs vagues à caractère moins catastrophique toutefois.

On pense même que l'ensemble du replat en amont du barrage est dû à un glissement ancien d'âge géologique (post-glaciaire) (glissement de la Pinéda et glissement de la rive gauche du Vajont plus près du barrage).

Puis vient une série de mouvements entre mars 1960 et octobre 1963.

- Mars 1960 : écoulement dans la paroi orientale du Mont Toc surplombant immédiatement le talweg et un peu en amont du débouché du Rio Massalezza.
- Mars 1960 : à l'Ouest du débouché du Rio, petit affaissement de 5 m d'une masse détritique à la base de la paroi du Mont Toc.
- 4 novembre 1960 : premier glissement dans le Mont Toc ; 700 000 m³ tombent dans la retenue (qui était à la cote 646) en 10 ou 20 minutes, produit une vague de 2 m. De nombreux microséismes ont été enregistrés du 20 octobre au 19 novembre, la distance épacentrale était de 1 à 2,5 km, l'activité avait surtout pour origine la rive gauche du Vajont en amont du barrage, c'est-à-dire la zone occupée par le futur glissement de 1963. Les vitesses de déplacement des témoins topographiques sont en augmentation constante jusqu'à atteindre 40 cm/jour. Lors de ce glissement, il y a apparition d'une grande fissure périmétrale de 2500 m de long remontant jusqu'à la cote 1360 ; L. MULLER (février 1961) fait un premier cubage des deux masses délimitées par la fissure et arrive au chiffre énorme de 200 000 000 m³, PENTA (1961) n'exclut pas, par contre, l'hypothèse d'un glissement superficiel. Le glissement du 4 novembre 1960 provoque une ordonnance du 4 décembre 1960 portant sur l'évacuation des localités du Mont Toc.
- Le 10 août 1963, éboulement entre 4 h 45' 5" et 4 h 52' 7" (CALOI) dont on ne connaît ni l'importance ni la situation.
- Le 9 octobre 1963, déclenchement du glissement principal à 22 h 39, dont nous allons décrire les principales caractéristiques.

d) Caractéristiques du glissement principal du 9 octobre 1963.

- Volume de la masse glissée : 300 000 000 m³.
- Superficie : 2 km².
- Front du glissement : 2 km.
- Les points hauts de l'arrachement dominent la retenue de 550 à 700 m.
- Vitesse : environ 400 m en une demi-minute, soit à peu près 50 km/h.
- Surface de glissement dans les calcaires ondulés du Malm, en forme de "fauteuil" ; la pente moyenne de cette surface est de 40° pour la partie "dossier" (avec des maxima de 46°) et devient subhorizontale dans la partie "siège" (certains secteurs, en particulier ceux les plus orientaux ont 20° de pente pour le siège).
- Niveau de la retenue : 700,42.
- Résultats : vagues dans la retenue, 30 000 000 m³ jaillissent au-dessus du barrage à une hauteur de 100 m environ et vont détruire le village de Longarone en aval dans la vallée de la Piave. Le barrage résista aux chocs de la masse et de la vague.

e) Histoire de la retenue entre 1960 et le 9 octobre 1963.

Un diagramme simple (fig. 45) illustrera l'évolution des vitesses dans le temps, pour deux témoins.

- Avant le glissement du 4 novembre 1960 :
 - + On commence à remplir la retenue au début de 1960 (16 février, autorisation de mise en eau jusqu'à la cote 595), un dispositif de contrôle par mesures topographiques est mis en place (14 repères contrôlés continuellement à partir de mai).
 - + Du 1er mai au 10 septembre 1960, la retenue passe de la cote 595 à la cote 625, les témoins n° 2 et 3 se déplacent respectivement de 8 cm et 4 cm ce qui donne des vitesses de 0,6 et 0,4 mm/jour, les autres témoins réagissent moins.

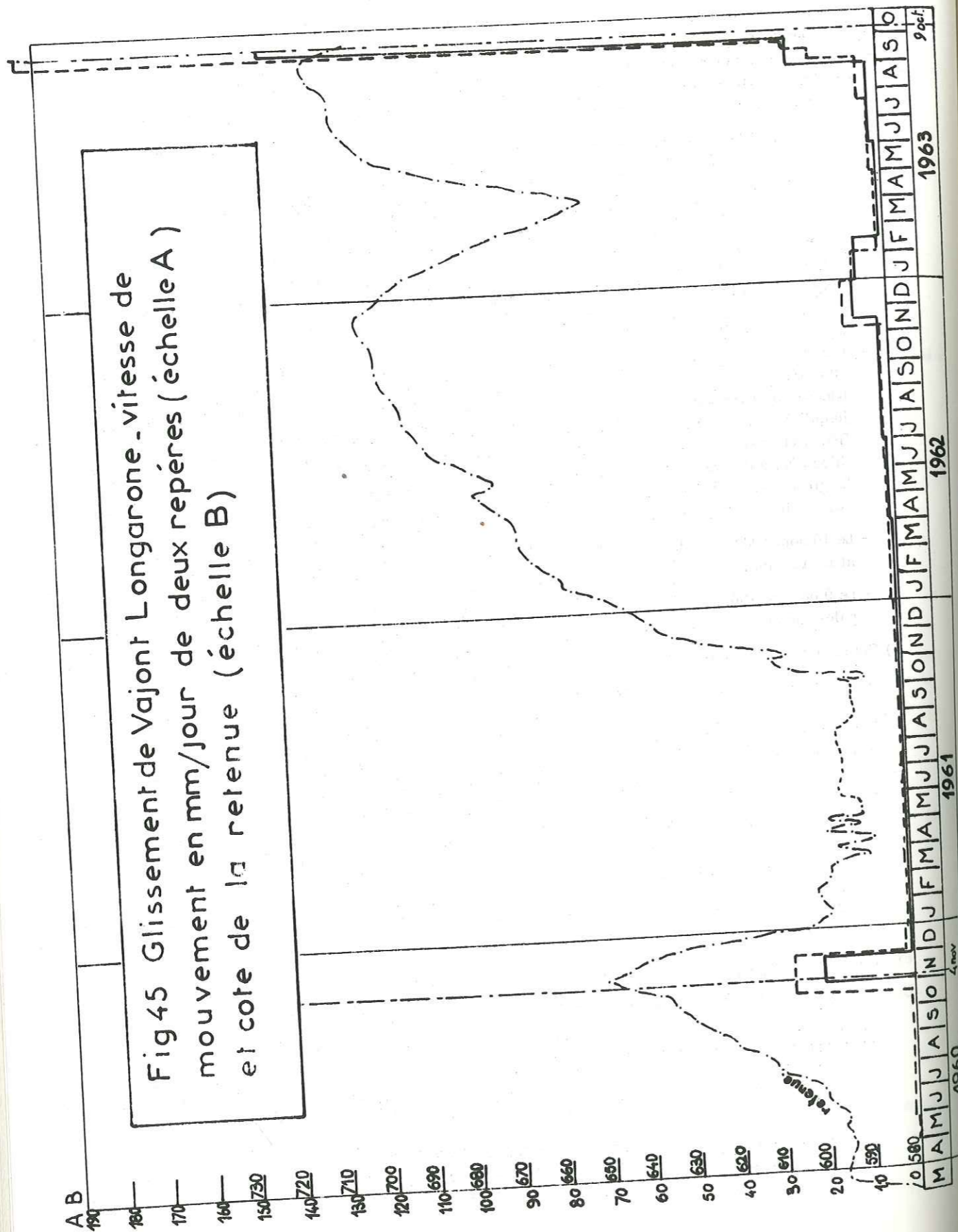


Fig 45 Glissement de Vajont Longarone - vitesse de mouvement en mm/jour de deux repères (échelle A) et cote de la retenue (échelle B)

+ Du 10 septembre au 4 novembre 1960 les vitesses croissent d'une façon continue, pour une élévation de la retenue de 20 m en cote (646). Les vitesses varient entre 15 mm/jour et 35 mm/jour. Ces chiffres peuvent paraître faibles, ils n'en sont pas moins des avertissements sérieux et doivent être considérés comme très préoccupants à l'échelle de l'exploitant.

+ 4 novembre 1960, premier glissement ; les vitesses chiffrées dans la période précédente se maintiennent jusqu'au 15 novembre, l'augmentation des vitesses est accompagné d'une pluviosité importante.

+ A partir du 15 novembre on baisse la retenue lentement 50 m en 50 jours, soit 1 m/jour, les vitesses retombent après une pointe d'au moins 50 mm/jour, la décroissance s'opère jusqu'au 31 décembre 1960.

- Après le glissement du 4 novembre 1960.

* Période de basses eaux.

+ Du 1er janvier au 15 octobre 1961 le niveau est maintenu entre la cote 590 et 600. Les déplacements restent faibles, les vitesses moyennes sont toutefois de 0,2 à 0,5 mm/jour. On implante de nouveaux points de contrôle topographique (surveillance de 23 points en plan et 11 en nivellement et il semble que ce ne soient pas les mêmes).

On constate que le front de la falaise a avancé entre mai et décembre 1960, de 20 cm à l'extrémité est, de 50 cm en se rapprochant du Rio Massalezza, et de 1 m en moyenne (maximum 1,4) à l'Ouest du ravin ; l'ouverture de la fissure périphérique du haut du versant laisse supposer que toute la zone a bien avancé aussi.

On a profité de cette période de basses eaux pour exécuter un profil sismique, deux galeries de reconnaissance de la surface de glissement et quatre piézomètres profonds ; ces travaux concluent à une diminution de la compacité, à l'ouverture généralisée des joints (grosses pertes d'eau en cours de forage).

On s'attend à quelques chutes de pans de falaises, de fait, pendant l'été 1961 une tour isolée (appelée Pinaacolo) dont le sommet s'était avancé de 8 m en 1 an, s'écroule.

Donc pendant ces 10 mois d'arrêt, on n'a enregistré aucune influence très appréciable des précipitations sur les vitesses ; néanmoins les deux chiffres cités ci-dessus (0,2 et 0,5 mm/jour) sont à noter comme faisant partie des phénomènes prémonitoires (phase de reptation) de tout glissement.

* 2e remplissage.

+ A partir du 16 octobre, on donne l'autorisation de monter jusqu'à la cote 640 à raison de moins d'un mètre/jour. Les mouvements sont restés faibles tant que la cote du premier remplissage ne fut pas atteinte.

+ A partir de janvier et février 1962, on note des pluies importantes et une progression des vitesses.

+ Le 17 novembre 1962 la retenue atteint la cote 700 maintenue jusqu'au 2 décembre, les repères accélèrent brutalement jusqu'à 10,2 mm/jour.

+ On baisse le niveau d'abord très lentement : 20 cm/jour, la vitesse des repères monte jusqu'à 14 mm/j.

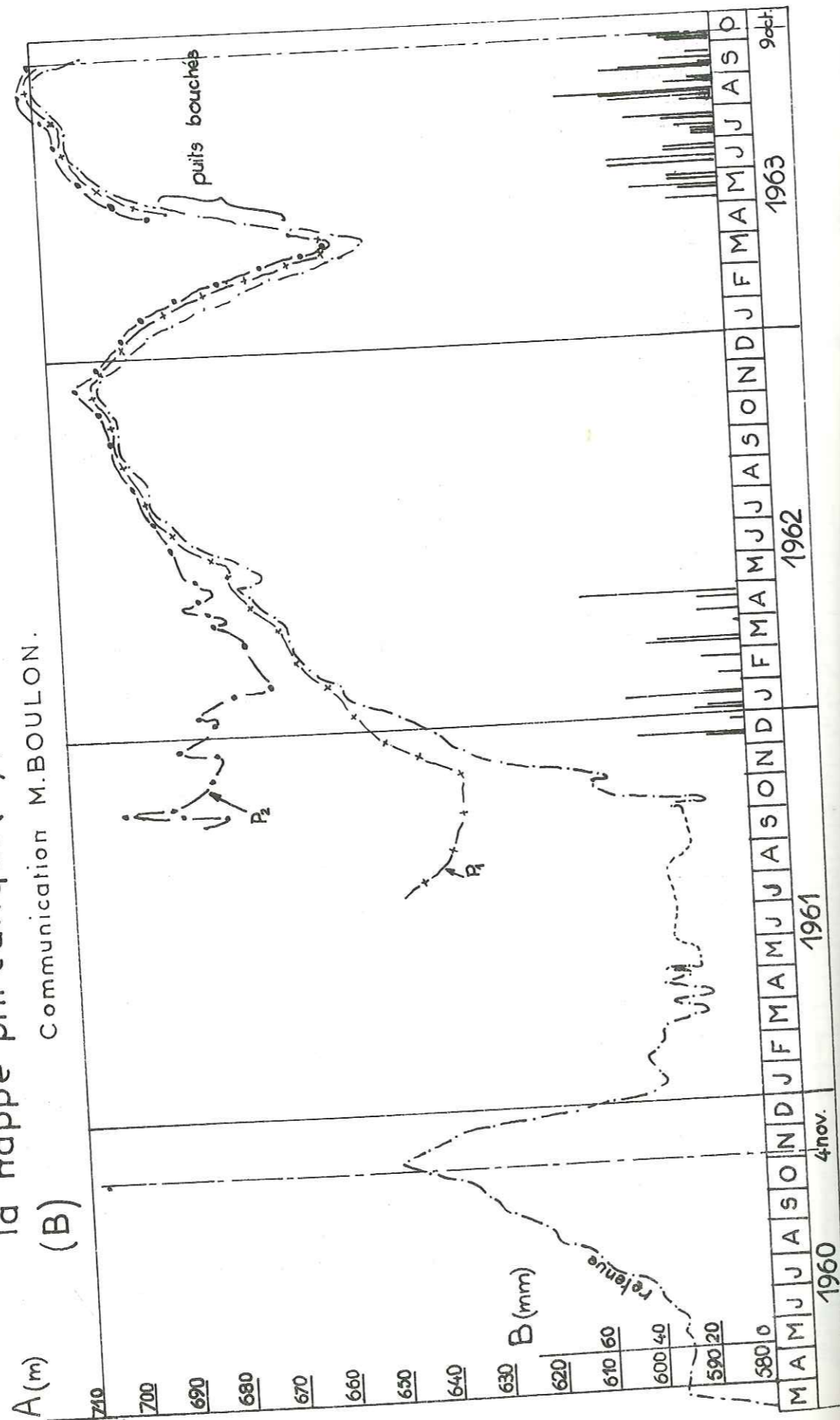
+ La vidange continue jusqu'au 10 avril 1963 (cote 647,5), les vitesses s'annulent progressivement.

+ Les piézomètres ont enregistré la montée avec un petit déphasage, puis ils ont très bien indiqué la descente (le niveau de la nappe et de la retenue se raccordant à quelques mètres près). Ce processus décrit dans le graphique de la figure 46 montre une perméabilité secondaire très grande correspondant à la désorganisation complète du rocher, ce qui constitue un autre avertissement très sérieux.

+ Pendant les 17 mois de ce cycle, l'ensemble du versant a avancé de 1,2 m en moyenne à l'Ouest et 0,6 m dans la partie est. La composante verticale du déplacement atteint 0,50 m en un point.

A cette époque on a trouvé très rassurant le fait que les vitesses soient restées inférieures à celles enregistrées lors du premier cycle.

Fig. 46: Retenue de Vajont Longarone(A) - Niveau de la nappe phréatique(A) puits P1 et P2 - Précipitations



° 3e remplissage.

+ On décide de reprendre le remplissage rapidement jusqu'à la cote 700, puis lentement avec un palier à 705; Les vitesses augmentent d'une façon modeste mais continue :

en août : v moy. = 2 à 4,5 mm/jour.

2 septembre : v max. = 6,5 mm/jour; cote du lac = 709,70
v min. = 3,0 mm/jour.

15 septembre : v max. = 12,0 mm/jour.

26 septembre : v max. = 22,0 mm/jour.

Ces chiffres restent inférieurs à ceux constatés en 1962.

+ Le 27 septembre 1963, la dernière vidange commence à un rythme plus rapide qu'en 1962, c'est-à-dire 66 cm/jour au lieu de 20 cm/jour. Les vitesses augmentent énormément et toujours continuellement :

2 et 3 octobre 1963 : v max. = 40 mm/jour.

9 octobre 1963 : v max. = 200 mm/jour cote du lac : 700.

9 octobre vers 23 h : v environ 50 km/heure.

+ Le premier juillet 1963 on avait rétabli le libre accès au lac après l'avoir interdit de juin 1962 à cette dernière date.

+ Les deux masses est et ouest ne semblent pas avoir glissées tout à fait en même temps, la partie ouest étant affectée d'un mouvement tournant alors que la partie est a glissé droit devant elle (le laps de temps est évidemment excessivement court et même inappréciable en regard de la durée totale du mouvement : 2 minutes d'après L. MULLER, ce chiffre correspond d'ailleurs à ceux estimés pour d'autres glissements de roche).

La part de responsabilité de la retenue se révèle donc prépondérante, notamment au stade des vidanges, en face de celle de la pluviométrie.

Depuis la catastrophe de nombreuses études ont été effectuées sur le site afin de préciser les propriétés du matériau (calcaires), de reconstituer les effets déstabilisants de la retenue. D'après T.C. KENNEY (1965), les effets déstabilisants de l'augmentation de niveau dans le bassin du Vajont seraient minces ce qui tendrait à prouver que la phase de reptation préparatoire amenant la pente aux limites de la stabilité était déjà commencé bien avant le début du programme de construction du barrage. Ceci n'amointrit pas la responsabilité de la retenue qui s'est comportée comme un accélérateur de mouvement.

En France, des mesures de contrôle très sérieuses ont été mises en œuvre sur certains sites ; à Ste Croix du Verdon, sur l'un des versants un glissement a été repéré, et il est suivi avant la mise en eau de la retenue par les services géologiques d'E.D.F. La société du canal de Provence surveille régulièrement, tous les mois, un des versants de la petite retenue de la Laye (près de Forclaquier) où un glissement ancien est très nettement marqué dans la topographie ; jusqu'à présent il n'a pas été décelé de mouvements.

H. BRETH (1967) a étudié la résistance au cisaillement d'une moraine sujette à des glissements de terrain lors du remplissage d'une retenue de barrage dans la vallée de Kauner en Autriche (voir figure 47).

Enfin KOPPEJAN, Van WAMELEN et WEINBERG (1948) estiment que l'établissement d'un processus de vidange au cours du retrait de la marée est une cause de glissements côtiers. (2)

(1) - Le lecteur consultera avec bénéfice les travaux de L. MULLER (1964) ; de G.A. KIERSCH (1964), de T.C. KENNEY (1967), de SELLI et L. TREVISAN (1964), de E. SEMENZA (1966-67), de NONVEILLER (1967).
(2) - KOPPEJAN, A.W. ; Van WAMELEN, B.M. et WEINBERG, L.J.H., "Coastal flow slides in the Dutch province of Zeeland" Proc. Second. Int. Conf. Soil. Mech., 5 : 89-92, 1948.

VI° - FACTEURS CLIMATIQUES

Le climat, on le sait, a une influence décisive sur les propriétés des sols et des roches, l'altération et l'altérabilité des roches, la végétation, donc sur le modelé et façonnement des terrains. Trois facteurs principaux suffisent à définir un climat :

- les précipitations solides et liquides ;
- la température ;
- l'humidité de l'air.

L'action des deux premiers en fonction du temps, entre en jeu d'une façon importante dans l'instabilité d'un versant.

VI°, 1 - Les précipitations.

De tout temps on a invoqué les violents orages, les pluies abondantes et prolongées pour expliquer le déclenchement de mouvements de terrain et leur procès n'est plus à faire dans la détermination de leur influence directe ou indirecte. Suivant la perméabilité des sols, leur intensité et leur fréquence, les effets peuvent être immédiats, la rupture se produisant quelques heures ou quelques jours après l'orage. Leur action est décisive dans le déclenchement, la remise en mouvement, l'accélération des coulées et des glissements de débris (voir tableau n° 21 et figure 48).

Leur mode d'action est très variable :

- elles accroissent le ruissellement provoquant les crues rapides des torrents de montagnes, d'où une reprise brutale de l'affouillement et départ de coulées du type earthflow ou mudflow.
- en s'infiltrant soit à la faveur de perméabilité plus ^{forte} faible, soit à la faveur de fissures ou crevasses, les pluies vont saturer les terrains en surface et favoriser le mécanisme de franchissement des limites de liquidité et plasticité générateur de la solifluxion.
- si la fracturation est plus importante permettant ainsi une perméabilité secondaire plus élevée (1) il peut y avoir développement d'une pression de filtration (cleft-water pressure) qui, à l'image de la pression d'eau interstitielle va réduire la résistance au cisaillement le long des parois des joints, processus de départ des écroulements et glissements de roches.
- en outre, les pluies font varier les niveaux de nappes. Les Norvégiens ont illustré, par des diagrammes statistiques, l'influence des pressions interstitielles sur la stabilité des talus raides (fig. 49 a et b). La région intéressée est affectée d'hivers rigoureux avec chutes de neige abondantes et de pluies violentes en automne ; la fréquence des glissements est plus grande en avril pendant la fonte des neiges et en octobre pendant les pluies, cependant ils sont plus importants en avril alors que les joints sont encore obstrués par la neige, le niveau de la nappe e d consécutif à une forte pluie monte alors en e' d' causant la rupture d'une masse telle que a, b, c. La glace créant des sous-pressions n'est d'ailleurs pas nécessaire à l'instauration de pressions de filtration destructrices. (fig. 49 d).
- outre les actions d'ameublissement des sols, les pluies auront pour conséquence la dissolution des ciments, des fractions minérales solubles et l'hydrolyse des minéraux.
- enfin les averses contribuent, en saturant des déblais, à augmenter leur poids et à accroître la contrainte de cisaillement du sol support par surcharge. La neige agit aussi en surchargeant les terrains et en les saturant, mais son action la plus préjudiciable consiste en la libération rapide d'une grande quantité d'eau, certaines terrasses de solifluxion sont liées à la présence de névé.

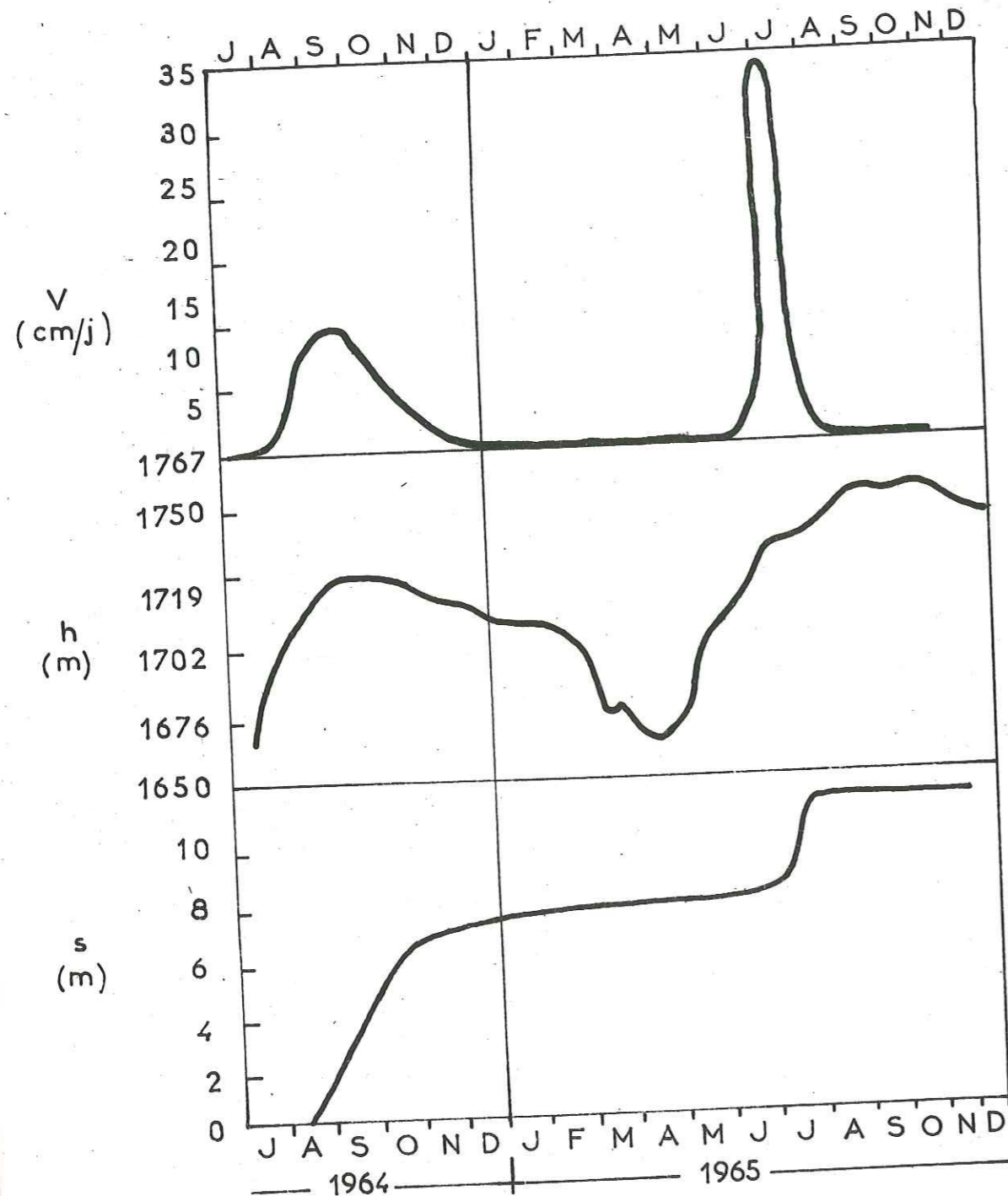


Fig. 47 Influence de la hauteur d'eau de la retenue et du mouvement de la pente sur la stabilité de celle-ci: Vallée de Kauner (AUTRICHE).

V: vitesse de mouvement: cm/jour h: niveau de la retenue: m
s: déplacements horizontaux: m

(1) - La perméabilité secondaire est celle résultant de la présence dans le matériau de fissures continues et ouvertes à des degrés variables.

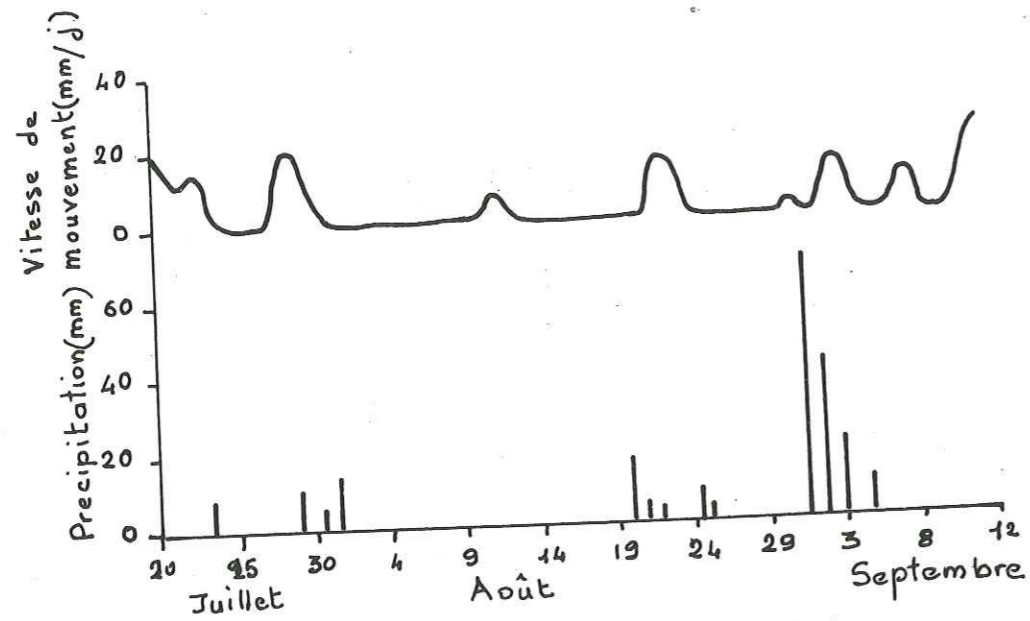


Fig 48a - Influence des précipitations d'été sur les vitesses de mouvement (région de Kamiya, Japon, 1949)

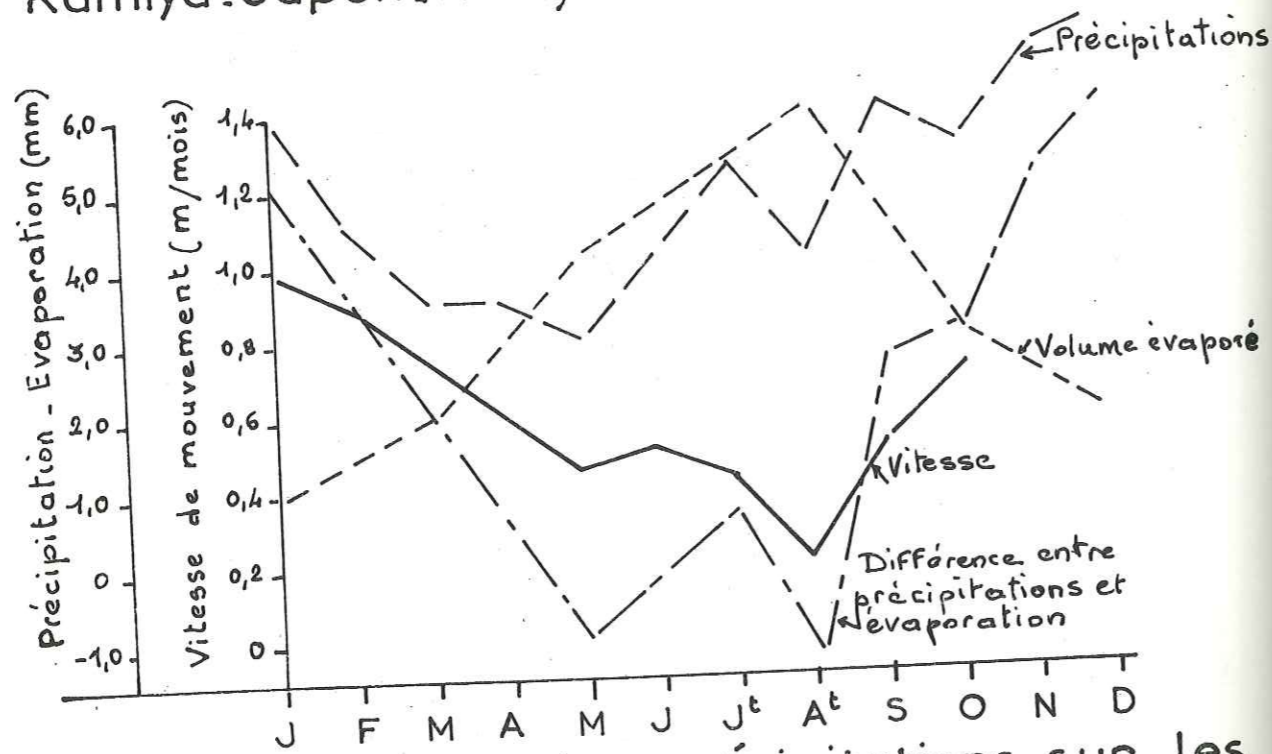


Fig 48b. Influence des précipitations sur les vitesses compensée en partie par l'évaporation.

TABEAU N° 21 - PLYVIONMETRIE EN MM. SUR LES REGIONS ENVIRONNANT LES ZONES DES GLISSEMENTS DE ROQUEBILIERE - SERRIERES EN CHAUTAGNE - MENTON.

CATASTROPHE DE ROQUEBILIERE les 25 - 29 - 30 novembre 1926.

Station Pluviométrique	Octobre	Novembre	Total	Moyenne	21 oct. - 23 Nov.	Jours de pluie	19 - 23 novembre
GRASSE	132	577	709	--	511	23	--
BREUIL	290	595	885	--	689	23	--
VENANSON	520	1500	2020	350	1712	23	750

GLISSEMENT DE SERRIERES EN CHAUTAGNE (SAVOIE) le 17 janvier 1936.

Station Pluviométrique	Novembre 1935	Moyenne	Octobre 1935	Moyenne	1e quinzaine janvier 1936	Total	Moyenne
CHAMBERY	245	99	199	102	97.9	542	238

GLISSEMENT DE DEBRIS ET COULEES DE MENTON Nuit du 24 - 25 avril 1952.

Station Pluviométrique	22 au 23 avril	23 au 24 avril	24 au 25 avril	Total
VAL DU CARET	10	122	174	306 mm en 72 heures

VI°, 2 - La température.

VI°, 2-1 - Les alternances de saisons sèches et humides provoquent :

- la dilatation du tapis végétal facilitant un accroissement de l'infiltration ;
- la dilatation du sol lui-même et sa fissuration, ceci est net pour les sols très argileux ; il y a perte de cohésion et abaissement de la résistance par fissuration et possibilité d'infiltrations d'eau importantes dans des couches jusqu'alors préservées ;
- la variation des propriétés plastiques, processus bien connu des céramistes qui exaltent la plasticité de leurs argiles en opérant des humidifications répétées, suivies de séchages modérés ;
- le séchage des schistes aboutit aussi à des fissurations dans les plans de schistosité et de stratification et à une réduction en particules granulees.

VI°, 2-2 - Les cycles gel - dégel.

La congélation d'eau dans le sol, suivie de fusion, a un certain nombre de conséquence sur la stabilité notamment des couches superficielles.

- Le gel provoque une augmentation de pression sur les parois des joints et fissures.
- Le gel contribue à l'ameublissement progressif des matériaux.
- Les alternances gel - dégel sont donc déterminantes dans l'activation de la solifluxion et de la reptation, très néfastes à la bonne tenue des routes de montagnes ou des pays froids.

Le mécanisme est le suivant : il y a expansion et soulèvement du sol sous l'effet gonflant du gel (frost heave) et déplacement de matière. Mais cela suppose un processus constant à toutes les profondeurs, or la nature du sol, la vitesse de gel, les circulations d'eau sont très variables, le déplacement total e1, e2, e3, ne peut donc être traduit par une droite du style A B (fig. 50 a) mais par une courbe telle que C D (fig. 50 b). Pour J. WILLIAMS la longueur de déplacement par cycle dL est égale au produit de la pente par la hauteur de soulèvement dE (prise normalement à la surface topographique) :

$$dL = dE \cdot \text{tg } \beta$$

La formation de lentilles ou de couches de glace dépend bien entendu de nombreux facteurs - granulométrie - circulation d'eau - vitesse de gel etc... Le gonflement dû au gel va faire croître l'indice de vide se traduisant alors par une augmentation de la perméabilité parallèlement à la surface du sol (d'après TAYLOR une augmentation de 15 % de l'indice de vide provoquerait une perméabilité 10 fois plus forte). La cohésion et la résistance au cisaillement diminuent elles aussi, si bien que pour une pente même faible, la libération assez brutale d'eau entraînera un mouvement de grains du sol. D'après des études routières faites en Alaska, les conditions climatiques optima pour le déclenchement de reptation et de solifluxion, consistent en des variations importantes de température entre l'été et l'hiver et en l'existence de gel estivaux et de dégel hivernaux.

VI°, 3 - Conclusions - classification climatique des mouvements de terrain.

Les principales conséquences des facteurs climatiques sont :

- la saturation des sols par infiltration ;
- une surcharge ;
- l'ameublissement progressif des terrains ;
- la dilatation du tapis végétal favorisant une humidité plus grande ;
- la dilatation des fissures et crevasses favorisant par la suite l'installation de pressions destructrices ;
- la dilatation ou la concentration du sol par chauffage et dessiccation ;
- la dissolution des grains fins par lessivage ;
- la dissolution des fractions solubles (minéraux - ciments) ;
- la transformation, par hydrolyse, de certains minéraux en argile.

De même que les géographes comme R. GALON (1954) ont déterminé de véritables familles climatiques de versants, de même nous pouvons essayer, à la suite de SHARPE, de corréler des types de glissement en fonction de zones climatiques données. La corrélation est difficile dans le cas de glissement proprement dit ; précisons cependant qu'un climat humide est favorable au déclenchement des "slumps", glissements de débris, glissements de roches. Un

Fig 49 b. Influence de la position de la nappe sur la stabilité des talus en pente raide.

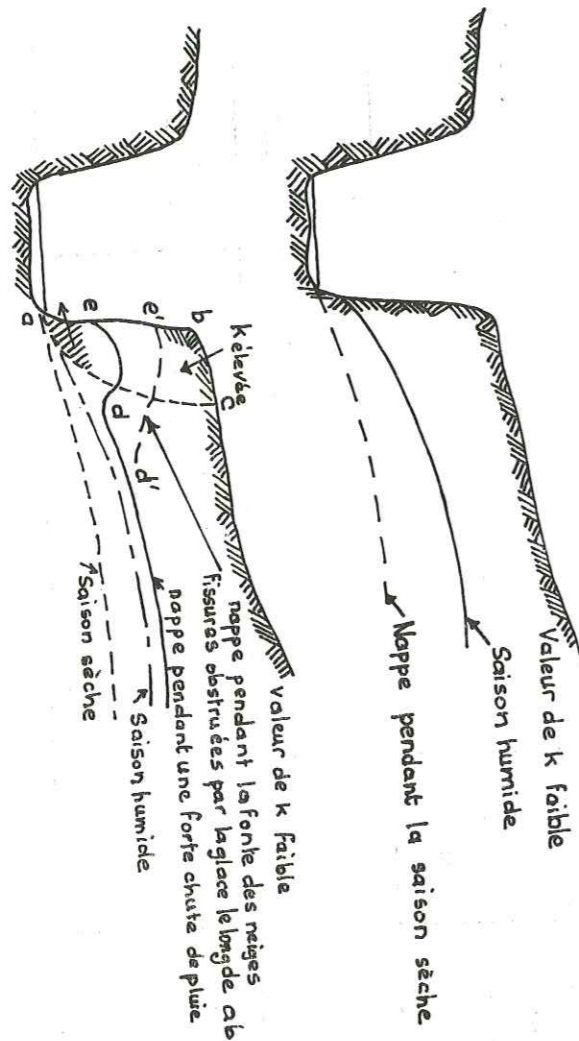
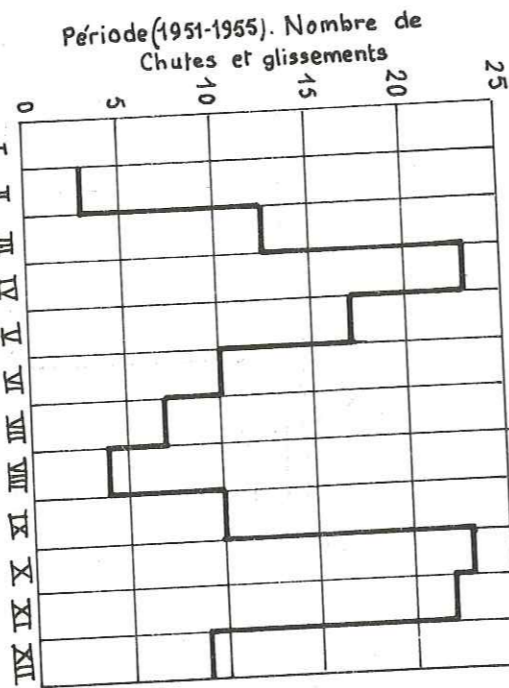
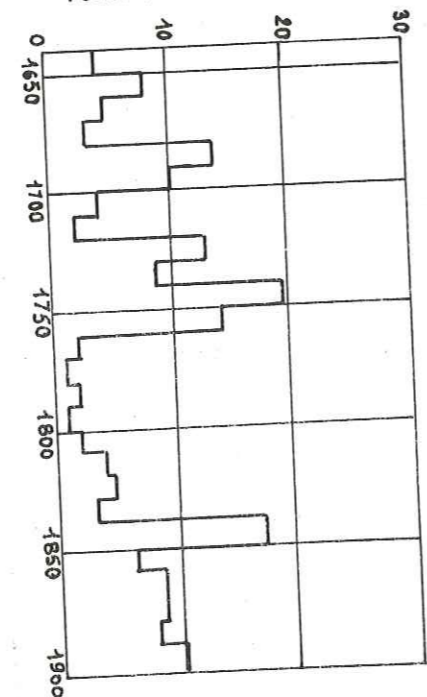


Fig 49 d Variations saisonnières de fréquence de chute de talus en Norvège



Nombre de chutes et de glissements rocheux en Norvège



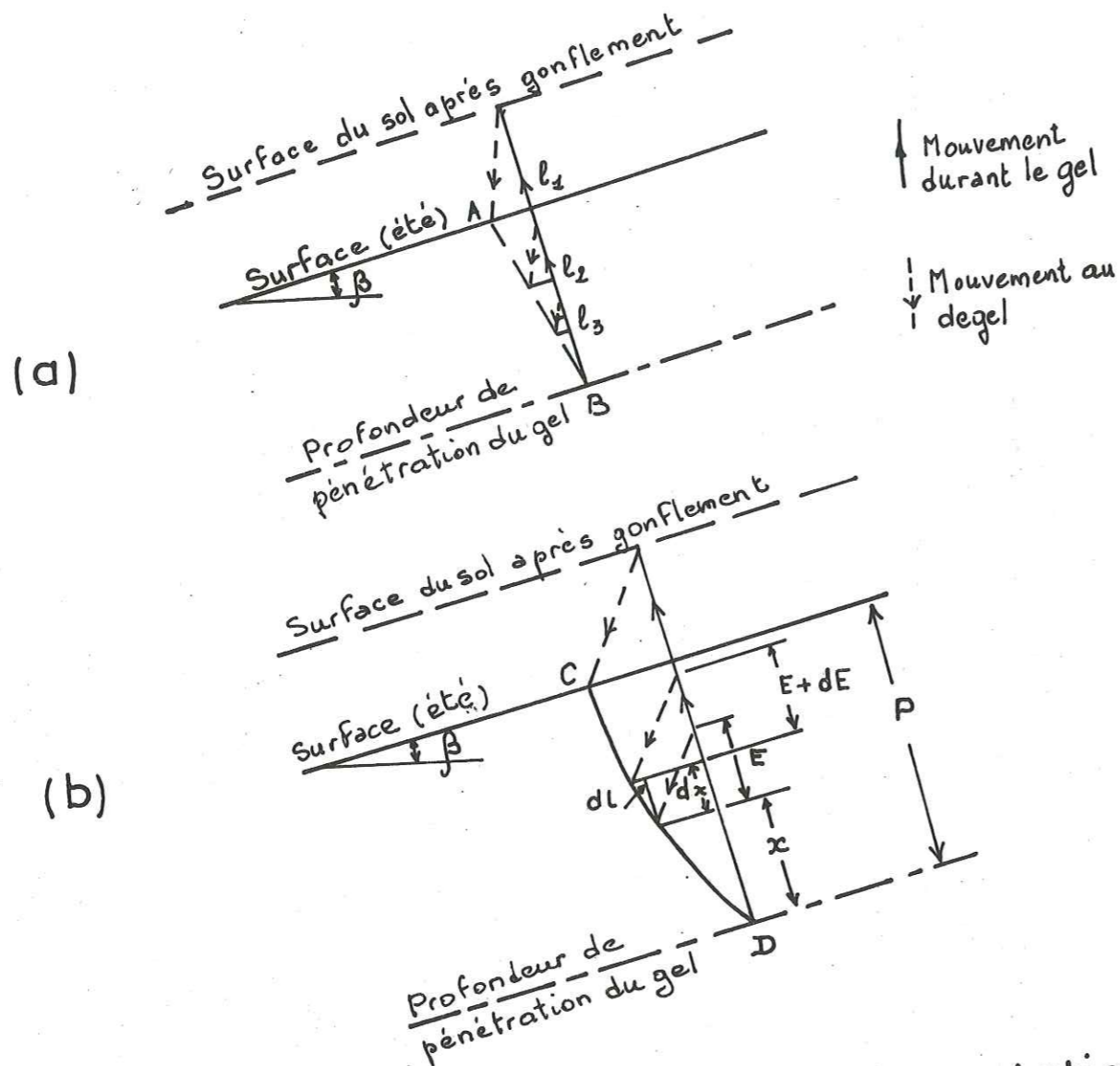


Fig. 50 Effets gonflants du gel reptation au dégel. (a) cas théorique - (b) cas réel : accroissement du déplacement dl proportionnel à $\text{tg} \beta$ - $dE =$ gonflement d'une tranche de d'épaisseur x à la cote $P-x$, $dl = dE \cdot \text{tg} \beta$. Un gonflement de 0,50 m dans une pente de $5^\circ =$ déplacement de 4,4 cm au dégel.

climat tempéré humide, froid avec possibilité de périodes prolongées de gel aura une influence sur les écroulements et les glissements de blocs.

Les influences climatiques sont plus nettes dès que l'on s'intéresse aux coulées, à la reptation et à la solifluxion.

- En climat tempéré humide, les coulées boueuses du type earthflow sont fréquentes, elles s'insèrent dans le cycle normal de l'érosion et permettent une évolution rapide de nos versants de montagne. Dans de nombreuses régions des Alpes du Nord, où la forêt et la prairie réduisent le ruissellement (surtout la forêt), ce sont les coulées qui effectuent l'essentiel du modelé des versants.

Les coulées du type mudflow sont aussi favorisées par le caractère intermittent des apports d'eau, provenant de la fusion de la neige. Certains y voient même l'occasion de distinguer un type de mudflow alpin ; BONNEY et DICKSON pensent d'ailleurs que de nombreuses accumulations de blocs sont dues à des mudflows post-glaciaires.

Une partie des phénomènes de reptation est liée à cette zone climatique : les eaux d'infiltration favorisant une désagrégation chimique du rocher et une saturation de la masse de débris.

La solifluxion, enfin, est au même titre que les coulées, un des types de mouvement dominant.

- En climat périglaciaire et secteurs de haute montagne, les coulées du type earthflow sont nombreuses et "constituent un élément essentiel du mécanisme morphologique" (TRICART et CAILLEUX).

La reptation et la solifluxion (à des degrés moindres) du fait des périodes de gel prolongées seront très importantes et quasi généralisées.

- En climat tropical chaud et humide, les alternances saison sèche - saison humide altèrent profondément les roches et fournissent ainsi une matière abondante aux mécanismes de reptation. Les saisons humides peuvent se solder par le déclenchement de coulées. Toutefois il faut se souvenir que la forêt dense, régnant sous ces climats, entrave considérablement les déplacements de débris.

- En climat chaud et sec, subdésertique, les coulées du type earthflow sont rares du fait de la discontinuité et de la forêt et de l'épaisseur réduite de la couverture végétale ne permettant pas une infiltration ni une percolation importante de l'eau (même à la suite de violentes averses).

On parle souvent pour cette zone climatique d'un mouvement typique : le mudflow semi-aride (désert mudflow, mudspate) déclenchés sur des pentes modérées par des orages violents et brusques imbibant rapidement la couche de matériaux altérés déjà soumise auparavant à la reptation.

VII° - LA VEGETATION.

L'action de la végétation dans le déclenchement de glissements est très mal connue sans doute parce qu'elle est reléguée dans le groupe des critères mineurs d'instabilité. Le fait d'ailleurs d'incriminer la végétation, peut paraître paradoxal, à une époque où l'on considère encore le reboisement comme un bon remède tant préventif que correctif. D'après J. MESSINES du SOURBIER "le rôle de la forêt est neutre en matière de glissement", la forêt glisse quand les forces mises en jeu sont très importantes et se révèlent incapables d'entraver des mouvements profonds, bien plus, elle les favorise une fois déclenchés.

Nous noterons cependant un certain nombre d'actions indirectes de la végétation sur la stabilité des versants.

- La forêt est l'antidote du ruissellement ; elle augmente la perméabilité des sols par l'action aérante de ses racines et par le développement d'une couche d'humus à grande porosité. Elle permet donc des infiltrations importantes compensées en partie par son pouvoir d'évapotranspiration.
- Elle entretient une forte humidité.
- Certaines essences, en particulier les résineux qui fournissent de grands arbres, sont des surcharges pour le versant. Les arbres se couchent assez facilement et en se déracinant laissent de grands trous profonds de 2 à 3 m permettant à l'eau de mieux s'infiltrer et de déclencher des mouvements de solifluxion. Dans le Grésivaudan, les forestiers ont été obligés de couper les résineux de la forêt de St-Hugon pour décharger le versant et le stabiliser par la suite.
- La pénétration des racines favorise la décomposition de certains matériaux ainsi à Argentine (Basse Maurienne), la forêt pousse sur un versant à forte pente constitué de schistes à stratification verticale. Les racines pénétrant dans ces schistes ont favorisé l'action de l'eau, et le terrain s'est mis à "foirer" sur une faible épaisseur.

- Une action indirecte, mais néanmoins néfaste de la végétation consiste aussi dans le glissement de déblais sur une pente non ou insuffisamment débroussaillée. Nous avons pu observer de tels mouvements dans des déblais pierreux et argileux dus en partie à l'absence de débroussaillage dans une pente relativement forte (30°) ; les feuillages et arbustes couchés dans le sens de la pente ayant joué le rôle de "glissoir".

Ces quelques données ont trait à des mouvements superficiels, nous ne connaissons pas d'exemple de glissement profond mettant en cause le couvert végétal ; il y a là encore un vaste domaine à explorer.

VIII° - SUPPRESSION DE SUPPORT.

Elle est due principalement à l'enlèvement de matériaux soit au pied du versant, soit latéralement, soit en profondeur. Le résultat est l'augmentation de la pente, accompagnée d'une augmentation de la contrainte de cisaillement, et de l'ouverture de fissures dans la pente (surtout si elle est schisteuse ou argileuse). Cet état de chose peut être naturel ou artificiel.

VIII°, 1 - Actions naturelles.

Dans celles-ci nous rangeons :

- l'érosion du pied de versant par un cours d'eau en crue, qui représente dans l'échelle des temps un phénomène subit et rapide. L'enlèvement brutal et intensif des matériaux des berges aboutit à un raidissement de la pente à proximité du cours d'eau, à la création de surplombs menant à des ruptures d'équilibre à plus court terme. De nombreux torrents savoyards sont ainsi à l'origine de coulées dévastatrices.
- la dissolution de matériaux solubles tel le gypse peut causer des effondrements importants entraînant le déséquilibre des couches sus-jacentes et partant de tout le versant.
- le processus de glissement lui-même contribue à raidir une pente, préluant à une succession rythmique de mouvements.
- la diminution de volume d'une couche sous-jacente par départ des matériaux fins la constituant, se classe aussi dans les suppressions de support.

VIII°, 2 - Agents humains.

Ce sont les coupures de versant occasionnées par la construction de routes, de canaux, l'exploitation de carrières, de mines. L'éroulement de Elm (Suisse) a vraisemblablement été favorisé par les exploitations de carrières sur les flancs de la vallée. Le danger est encore accru lors de la traversée d'anciens glissements par des tranchées de voies de communication, la masse de terre étant déjà suffisamment disloquée et décomprimée peut se remettre facilement en mouvement (la route du col de Lus-la-Croix-Haute en donne quelques exemples).

IX° - LES VIBRATIONS.

Les vibrations qu'elles soient temporaires et dues aux tremblements de terre, ou artificielles et entretenues, (exploitation à l'explosif, roulage d'engin lourd etc...) affectent toujours un versant plus ou moins profondément. Les plus fortes et les plus néfastes sont bien entendu celles développées par les secousses sismiques qui, suivant leur degré, sont susceptibles de mettre en mouvement des masses importantes. L'action instantanée des tremblements de terre est complexe; elle se traduit en général par les faits suivants :

- augmentation de la contrainte de cisaillement, accompagnée d'une diminution de la résistance au cisaillement ; il y a donc modification des contraintes et de leur répartition à la suite de l'apparition de forte accélération horizontales (ng)
- tremblement de terre sévère = degré IX : ng = 0,1
 " " violent = degré X : ng = 0,25
 " " catastrophique = degré XI : ng = 0,5

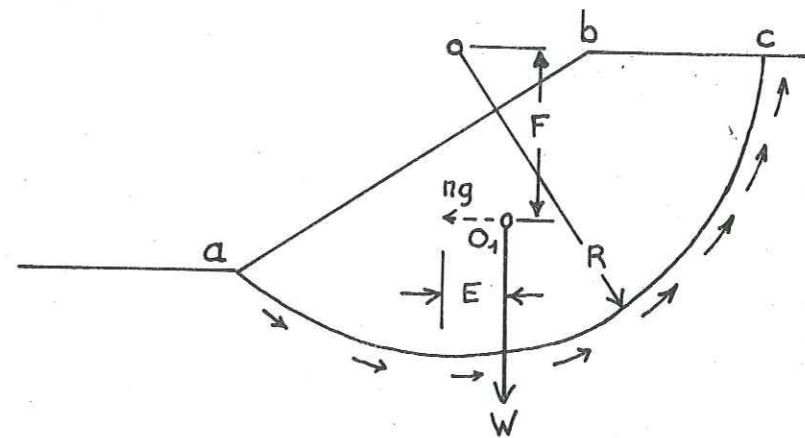


Fig 51a Calcul des effets d'un tremblement de terre vis à vis de la stabilité des talus cas théorique.

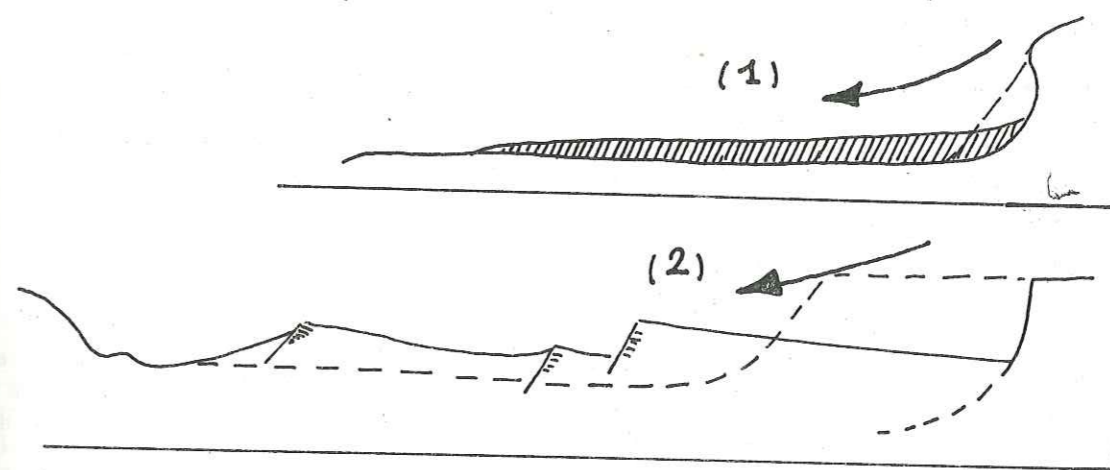


Fig 51b Glissements déclenchés au Chili, région de Neltune (1) et Rinihue (2) à la suite du tremblement de terre du 22 Mai 1960. intensité = degré IX ou X, $\gamma = 100$ et 200 cm/s^2 durée : plus de 200s d'après H.TAZIEFF. Distance horiz. parcourue = 1000 m.

Le coefficient de sécurité $F_s = \frac{\text{mouvement resist.}}{\text{mouvement moteur}} = \frac{s.l.R.}{E.W}$ (fig. 51) est donc réduit $F's' = \frac{s.l.R.}{E.W + ng.F.W}$

- une diminution de la cohésion par variations brutales dans les liaisons intergranulaires. Le loess soumis à des chocs violents perd instantanément toutes ses liaisons intergranulaires et se met en mouvement sous forme de "coulées sèches", les particules restant en suspension dans l'air. Un tel processus a dû présider au glissement de terrasses de loess en Chine dans la province du Kansu en 1920.
- un rejeu des accidents tectoniques, et fractures affectant le versant. La vague de 1938 dans la baie Lituya en Alaska (Don J. MILLER) fut causée par un glissement de roches accompagnant le rejeu de la faille majeure Fairweather lors d'une secousse sismique. Une minute après les premières secousses, le glissement de roches de la crique Gilbert se produisit et les débris tombaient dans la baie provoquant une vague de 500 m de haut se déplaçant à la vitesse de 100 miles (ce véritable raz de marée n'est peut-être pas dû entièrement au seul glissement d'après l'auteur).

De nombreux auteurs ont été tentés autrefois d'attribuer les écroulements et glissements catastrophiques aux tremblements de terre. De fait un certain nombre d'entre eux sont directement causés par des secousses, ce qui justifie la grande attention portée aux enregistrements sismiques par les Japonais et les Russes. L'écroulement historique du Mont Dobratsch à l'Ouest de Villach dans la vallée du Gail (Carinthie) le 25 janvier 1348 est dû au non moins célèbre tremblement de terre de ce même 25 janvier. Cet écroulement dans les calcaires et dolomies, de 35 000 000 m³ s'inscrit dans un ensemble de glissements anciens plus importants d'un volume de 535 000 000 m³; le même séisme d'après F. MONTANDON aurait provoqué les glissements de Siror dans la vallée du Cismon (Dolomites); d'An-telea, vallée du Boite; de Monte Ajarnola, vallée de la Padola (bassin supérieur de la Piave).

Quant à l'étendue du désastre provoqué par les tremblements de terre, certains auteurs (O. LANSER) d'après des observations effectuées dans les Andes Péruviennes pensent que c'est à partir du degré 10 que les secousses peuvent produire des écroulements et glissements importants; en fait cette notion est étroitement liée aux conditions de fracturation du massif et à la nature des matériaux. Au cours des séismes du Chili (25 mai 1960), on a noté ainsi les sites les plus défavorables:

- alluvions récentes: expulsion d'eau et tassement inégaux;
- formations de pente: remise en mouvement;
- terrasses d'alluvions anciennes: effondrement des bords.

Les ébranlements causés par les activités humaines peuvent aussi provoquer des glissements quoique de dimensions plus modestes. Il s'en est produit en Suisse, à la suite d'un pétardage intensif de souches d'arbres. Ces vibrations artificielles assez faibles, en regard de celles citées plus haut, semblent n'affecter en général que des terrains ayant déjà glissés.

X° - LES SURCHARGES.

Toute surcharge naturelle ou artificielle déposée sur une pente quelconque peut avoir des conséquences néfastes suivant l'importance de cette surcharge, la pente du talus, la nature des couches-support. En règle générale, une surcharge implique une pression forte en un point relativement localisé, une réduction considérable de la résistance au cisaillement de la couche molle sujette à son action.

X°, 1 - Surcharges naturelles.

Ce sont essentiellement les accumulations de débris recouvrant des matériaux tendres ou ayant déjà glissé. Les reprises de mouvement, très localisées à l'intérieur d'un glissement ancien, sont souvent le point de départ d'une réaction en chaîne, les surcharges momentanées causant des ruptures successives. Une avalanche de neige ou de glace peut très bien remplir le rôle de surcharge, le glissement du Chatelard en Savoie pourrait s'être remis en mouvement en partie à cause d'une avalanche.

X°, 2 - Surcharges artificielles.

Les constructions de remblais, les stockages de débris miniers, les constructions lourdes sont souvent la cause primordiale de glissement de terrain. Un sol argileux ne peut résister indéfiniment à de fortes surcharges localisées; dès que la limite de résistance au cisaillement est dépassée si peu soit-il, il est à craindre l'apparition de fissures ou de crevasses de compression amorces d'un glissement qu'il sera très difficile pour ne pas dire impossible de stopper.

Nous citerons comme exemple le glissement du poste de transformation de Génissiat qui pu recevoir un traitement bénéfique. Le poste repose sur une croupe pentée de 20% vers le Nord et le Sud. Cette croupe est formée d'une couche d'argile lacustre jaune et grise, très fine (90% des particules inférieures à 0,02 mm : 20 microns); l'argile est soumise à une fracturation importante:

- un réseau de fractures de surface, importantes, apparaît l'été;
- un deuxième réseau plus profond (5 m) à fissures dirigées dans tous les sens.

Ces deux réseaux en fonction de leur continuité sont évidemment propices à la pénétration et à la circulation de l'eau.

Les essais de laboratoire (faits après le glissement) sur des argiles prélevées sur place ont donné les valeurs moyennes suivantes:

- teneur en eau: de 19 à 19,6%
- limite de liquidité: 37 à 41%
- limite de plasticité: 15 à 17%
- limite de retrait: 17%.

Nous voyons déjà que la limite de plasticité est toujours inférieure à la teneur en eau, cette argile subit donc des déformations plastiques. La limite de retrait (17%) est aussi inférieure à la teneur en eau d'où la grande aptitude à la fissuration.

Les travaux de terrassement du poste ont commencé en novembre 1943 et les déblais furent déposés en bordure, du côté nord en trois plates-formes successives. Jusqu'en octobre 1944, rien de spécial ne fut constaté, les plates-formes de décharges restaient horizontales. Les premiers mouvements furent constatés en novembre 1944, à l'occasion de la pose d'un évacuateur d'eau situé à l'Est de la décharge. La vitesse de mouvement en novembre 1944 atteint 5 cm les jours de pluie ce qui est déjà considérable; les décharges ont tendance à couler, il y a apparition de fissures et un premier glissement se produit à son pied puis successivement deux autres à l'aval (type = slump + coulée).

Pour le premier glissement, la vitesse quotidienne atteint 4 cm en juin 1945; 1,25 cm dans les deux quinzaines de juillet; 2,3 cm en août (pluvieux). En 162 jours le premier glissement a donc parcouru 1,80 m (soit en moyenne 1,1 mm/j.).

Le deuxième glissement parcourt 43 cm en 79 jours. Des lignes de jalons furent implantées par la C.N.R. dont une à l'aval du glissement afin de prévenir une mise en mouvement éventuelle d'une nouvelle masse de terrain.

Ce n'est que le 28 août 1945 (1 an 1/2 après) que l'on cessa d'amener des déblais qui atteignaient alors le volume de 15 000 m³ soit environ 30 000 tonnes sans tenir compte de l'eau d'imbibition qui introduit une charge supplémentaire, non négligeable et qui sature les terrains sous-jacents. L'enlèvement de la surcharge au printemps 1946, allié à diverses autres mesures confortatives (végétation - drainage par électroosmose) diminua la vitesse de mouvement.

XI° - CONCLUSIONS - MECANISME GENERAL.

On peut diviser schématiquement le processus dynamique des mouvements de terrain en trois phases principales:

- mouvements de surface précédant la rupture (phase de creeping);
- phase de la rupture proprement dite;
- répliques.

Tableau n° 22

FACTEURS CONTRIBUANT A AUGMENTER LA CONTRAINTE DE CISAILLEMENT
(d'après VARNES modifié)

- A - DISPARITION DE SUPPORTS LATERAUX

- A - 1 - Erosion par : - ruissellement
- glaciers
- vagues, courants côtiers
- altération, dessiccation, humidification

- A - 2 - Création de nouveaux versants : - rejeu de failles
- anciens écroulements
- affaissements

- A - 3 - Actions humaines.

- B - SURCHARGE

- B - 1 - Agents naturels : - pluie - neige - grêle

- B - 2 - Agents humains : - remblais - débris miniers etc...

- C - CONTRAINTE TRANSITOIRE.

- C - 1 - Vibrations naturelles : tremblement de terre, vibrations artificielles.

- D - INCLINAISON.

- D - 1 - Pente des talus.

- E - DISPARITION DE COUCHES SUPPORTS.

- E - 1 - Coupures de berges (vagues, rivières)

- E - 2 - Altération - action du gel etc...

- E - 3 - Erosion souterraine : - dissolution de gypse
- renard

- E - 4 - Actions humaines, galerie de mines

- E - 5 - Diminution de la résistance dans les matériaux sous-jacents

- F - PRESSION LATÉRALE DUE A

- F - 1 - Eau dans crevasses

- F - 2 - Gel de l'eau dans crevasses

- F - 3 - Gonflement.

Tableau n° 23

FACTEURS CONTRIBUANT A DIMINUER LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT
(d'après VARNES modifié)

- A - FACTEURS DERIVANT DE L'ETAT DU MATERIAU (NATURE - GEOMETRIE)

- A - 1 - Nature : - roches schisteuses - terrains argileux.
- roches facilement altérables.
- roches à minéraux tendres.

- A - 2 - Géométrie interne du matériau : - arrangement des particules dans les argiles sensibles.
- émoussé des grains.

- A - 3 - Géométrie du versant : - pente de la stratification.
- couche massive sur couche tendre.
- alternance lits perméables et imperméables.
- discontinuités : failles schistosité etc...

- B - ALTERATIONS ET ACTIONS PHYSICO-CHIMIQUES.

- B - 1 - Désintégration physique.

- B - 2 - Hydratation des minéraux argileux.

- B - 3 - Echange d'ions dans les argiles.

- B - 4 - Dessiccation des argiles.

- B - 5 - Séchage des schistes.

- B - 6 - Dissolution des ciments.

- C - VARIATIONS DANS LES LIAISONS INTERGRANULAIRES DUES A L'EAU INTERSTITIELLE.

- C - 1 - Poussée hydrostatique à l'état saturé.

- C - 2 - Pression intergranulaire.

- C - 3 - Pression de filtration.

- D - VARIATIONS DANS LA GEOMETRIE.

- D - 1 - Fissuration des argiles préconsolidées.

- D - 2 - Remaniement dans les matériaux sensibles, loess, sables secs ou saturés.

XI°, 1 - Mouvements de surface prémonitoires.

La phase préparatoire dépend essentiellement de la diminution du rapport de force $\frac{\text{contrainte de cisaillement}}{\text{résistance au cisaillement}}$. D'après VARNES ce sont les deux grands facteurs mécaniques jouant un rôle prépondérant dans la mise en mouvement, nous avons classé dans les tableaux n° 22 et n° 23 les divers facteurs agissant sur ce rapport. Cette phase est marquée par un certain nombre d'indices précurseurs faisant souvent appel à la légende ; ainsi HEIM (1882) rapporte que malgré l'effet de surprise total provoqué par le glissement de Goldau, les villageois avaient remarqué que le bétail était nerveux et que les abeilles avaient quitté leurs ruches. Il en est d'autres plus scientifiques tels :

- le ruisseau cessant de couler ce qui peut représenter nous le savons un phénomène précurseur éventuel des coulées, non obligatoirement suivi d'effets immédiats ;
- l'apparition de fissure délimitant des volumes susceptibles de glisser, indice dont on ne tient d'ailleurs jamais assez compte, le volume de roches mis en jeu dans la catastrophe de Vajont Longarone était délimité 3 ans auparavant par une fissure longue de 2 km environ ;
- la surveillance des vitesses et accélérations des déplacements de repères et des périodes de croissances continues.

La phase préparatoire se traduira par une courbe telle que celle de la figure 52 établie par K. TERZAGHI. Les abscisses représentent le temps depuis l'instant où les conditions internes ou externes changent. Les points en ordonnée situés au-dessus de l'axe des abscisses représentent le facteur de sécurité (Fs) vis à vis du glissement. Les points en ordonnée situés au-dessous de l'axe des abscisses traduisent le déplacement d'un point P quelconque du sommet de la zone de glissement.

La ligne O a traduit le mouvement précédent le glissement pour un coefficient de sécurité se rapprochant de l'unité.

La distance O DI est le déplacement du point quelconque au temps t I. OD I dépend de l'épaisseur de la zone dans laquelle l'état de contrainte approche de l'état de faiblesse. Si la zone est très fine comme à Goldau par exemple, la distance O D I n'excédera pas un pouce (25 mm). Si au contraire on a affaire à une masse homogène d'argile ou de résidu d'altération ne renfermant de couche de faiblesse potentielle, OD I peut être de plusieurs dizaines de cm et le glissement sera marqué par la formation de crevasses à son extrémité supérieure.

XI°, 2 - Phase de la rupture.

Les ruptures sur une surface ou une zone de glissement sont étroitement liées à un abaissement de la résistance au cisaillement. Cette phase en général rapide est représentée par la courbe ab.

La vitesse maximum dépend de nombreux facteurs - angle de talus - pente de la stratification - surface de glissement etc...

K. TERZAGHI admet que la diminution de résistance lors du glissement s'échelonne entre 20 % pour les sables meubles et argiles à basse sensibilité, et 90 % pour les sables saturés, les silts et les argiles molles extra-sensibles.

Puis les forces tendant à faire avancer les masses, diminuent au point b et il y a ralentissement ou arrêt des mouvements.

XI°, 3 - Mouvements après rupture.

Une fois la différence entre force motrice et force de résistance éliminée (point b de la figure 52), le mouvement passe par une phase de reptation lente et le versant recouvre un état d'équilibre, à moins qu'il y ait bouleversement complet des propriétés physiques et mécaniques de la masse glissée. Nous citerons le cas d'un glissement où l'argile dévonienne à porosité = 25 % était stable, puis s'est mise à gonfler et à se fissurer et à glisser. Durant ce processus, la porosité est passée de 25 % à 40 % au minimum ; les argiles ont donc pu se remettre en mouvement secondairement sous la forme de coulée, mécanisme assez courant somme toute, puisqu'il peut obliger les auteurs à créer ainsi des classes spéciales de mouvements de terrain.

Seuls, les tremblements de terre peuvent réduire instantanément le coefficient de sécurité. Toutes les autres actions agissent graduellement et la phase préparatoire marquée par des variations cycliques du coefficient de sécurité peut s'échelonner sur plusieurs années (fig. 53).

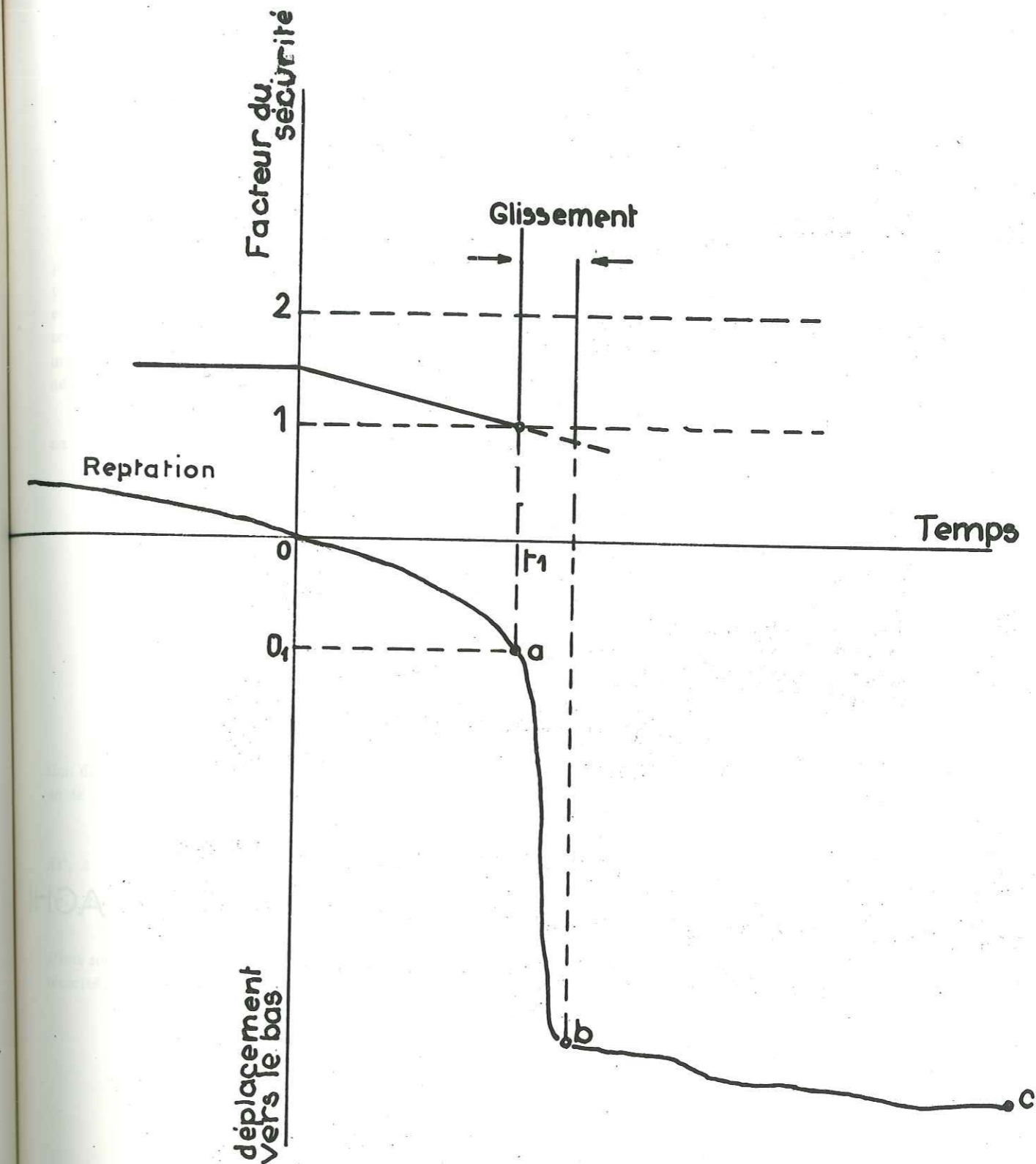


Fig. 52 Mécanismes général de glissement d'après K. TERZAGHI

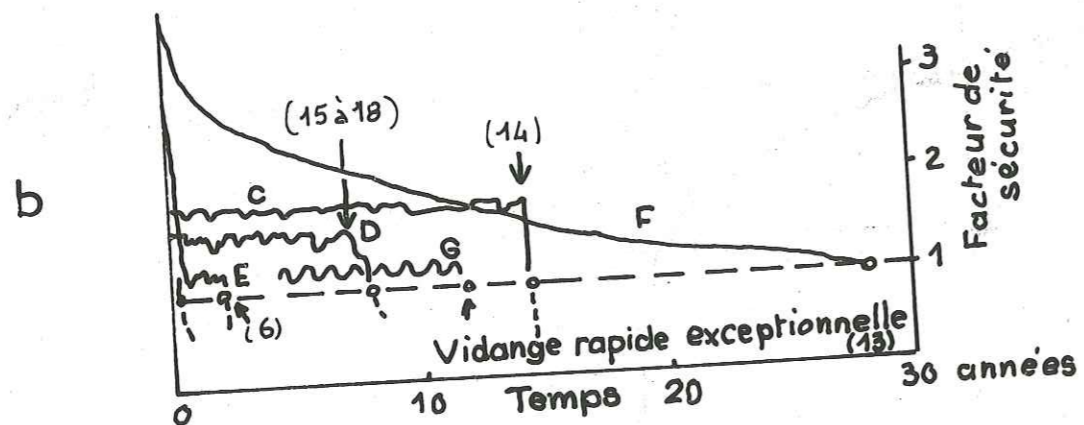
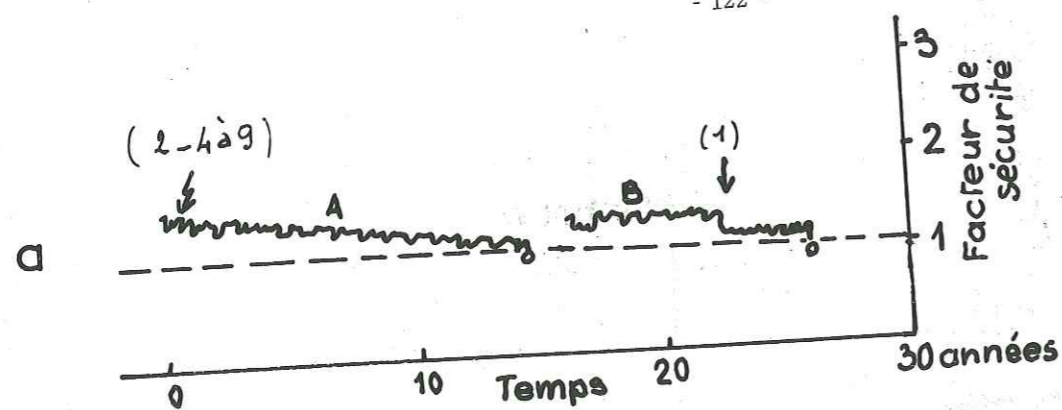


Fig. 53 a-b: Variations du coefficient de sécurité avant glissement, d'après K. TERZAGHI
 a: Versants anciens b: Versants récents

de A à E - Variation de pression d'eau interstitielle avec les saisons sèches et humides.
 G - Effets de remplissage et de vidange de réservoir.
 Les chiffres de 1 à 14 correspondent à ceux du tableau n° 24.

Pour l'éroulement de Frank (Alberta, Canada) dans la montagne de la Tortue, le 29 avril 1903, la rupture serait une combinaison de facteurs très divers :

- structure du versant et pente, couche tendre en pied de versant, fracturation importante ;
- circulation d'eau et gel intense dans les fissures ;
- secousses sismiques ;
- violents orages ;
- exploitations minières à la base de la montagne.

Les variations du coefficient de sécurité sont figurées dans la figure 54. L'action de l'eau et du gel favorisent par l'intermédiaire de la fracturation des calcaires, des petites variations cycliques ; il a commencé à décroître à partir de l'exploitation du charbon dans les couches tendres servant en quelque sorte de support à la masse calcaire et sans doute à la suite des secousses sismiques violentes de 1901, centrées sur les Iles Aléoutiennes. La cause finale serait, d'après de nombreux auteurs, un gel sévère pénétrant plus profondément qu'à l'ordinaire et faisant suite à une période de sécheresse et à toute la série normale des cycles gel - dégel sévissant depuis un certain nombre d'années auparavant.

J. N. HUTCHINSON a représenté approximativement la diminution du coefficient de sécurité lors du glissement en argile sensible, à Furre (Norvège) (voir figure 55).

- En 1877, le coefficient de sécurité à Furre était d'environ 1,4.
- Entre 1877 et 1957, la rivière a érodé la terrasse sur 20 m, réduisant le coefficient de sécurité à 1,15 en 1957.
- Au cours de l'hiver 1957 - 1958, les différents facteurs actifs (gel, neige, etc...) se traduisent par une nouvelle diminution, qui au cours de l'hiver suivant 1958 - 1959 atteindra la valeur de 1,09.
- Une pluviosité anormale et la fonte de neige en fin d'hiver 1958 - 1959, provoquent une montée du niveau de la nappe réduisant le coefficient de sécurité à 1,03 au mois d'avril 1959, pour le glissement principal.
- Un premier glissement de petites dimensions a lieu, ce qui suffit à provoquer le mouvement de toute la zone en équilibre très instable (glissement principal) lequel sera suivi aussitôt par des glissements secondaires de chaque côté.

Un bon nombre de facteurs ont contribué au déclenchement du glissement, le plus important étant la suppression de butée progressive en pied de terrasse, consécutive à l'érosion intense jusqu'en 1957 ; la cause finale consiste en de grosses chutes de pluie succédant à une période d'érosion intense correspondant à la fonte des glaces.

XI, 4 - Conclusion.

Nous avons donc divisé les principaux paramètres d'instabilité en deux groupes.

a) Les causes lointaines ou constantes du versant créant les conditions favorables au glissement, dont les effets sont lents et aboutissent à un abaissement progressif, soumis à variations cycliques ou non du coefficient de sécurité. Ces paramètres relèvent de :

- la géométrie externe du versant :
 - + exposition
 - + pente.
- la géométrie interne :
 - + disposition des différents volumes lithologiques.
 - + discontinuités affectant cette disposition.
- la nature des matériaux ; aussi bien physico-chimique, minéralogique et mécanique. On retiendra essentiellement les problèmes posés par la présence :
 - + de matériaux facilement altérables.
 - + de matériaux ayant peu ou pas de cohésion.
 - + de matériaux argileux.

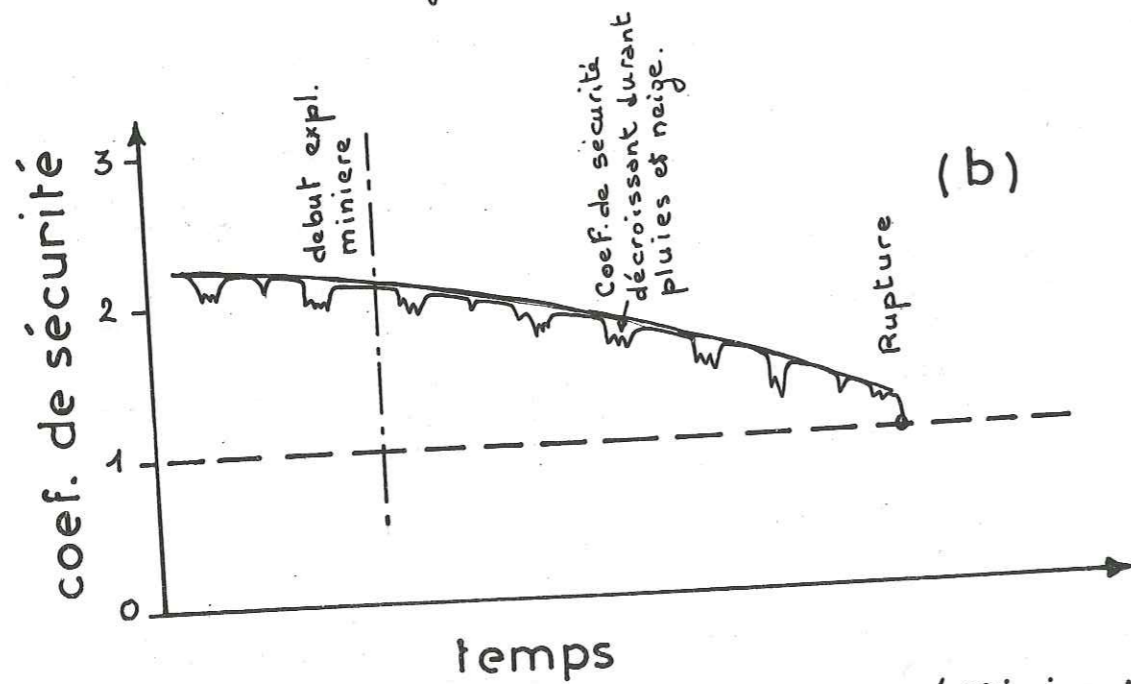
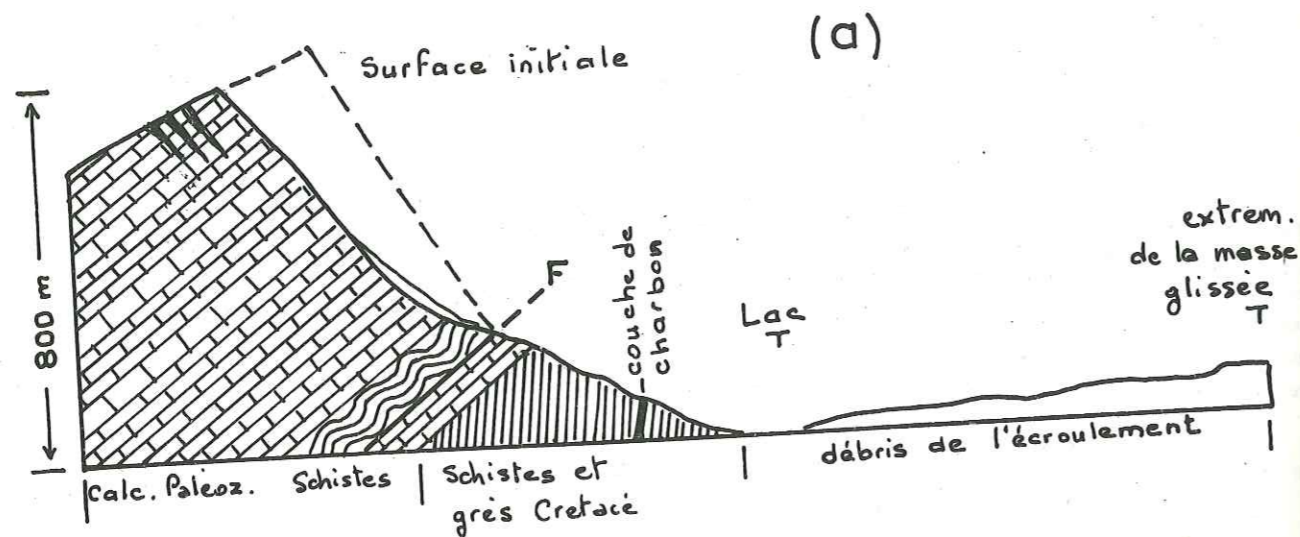


Fig 54 a-b: Variations du coefficient de sécurité dans le cas du glissement de Franck. (a) coupe de la montagne de la Tortue (Alberta). b évolution du coefficient de sécurité en fonction du temps

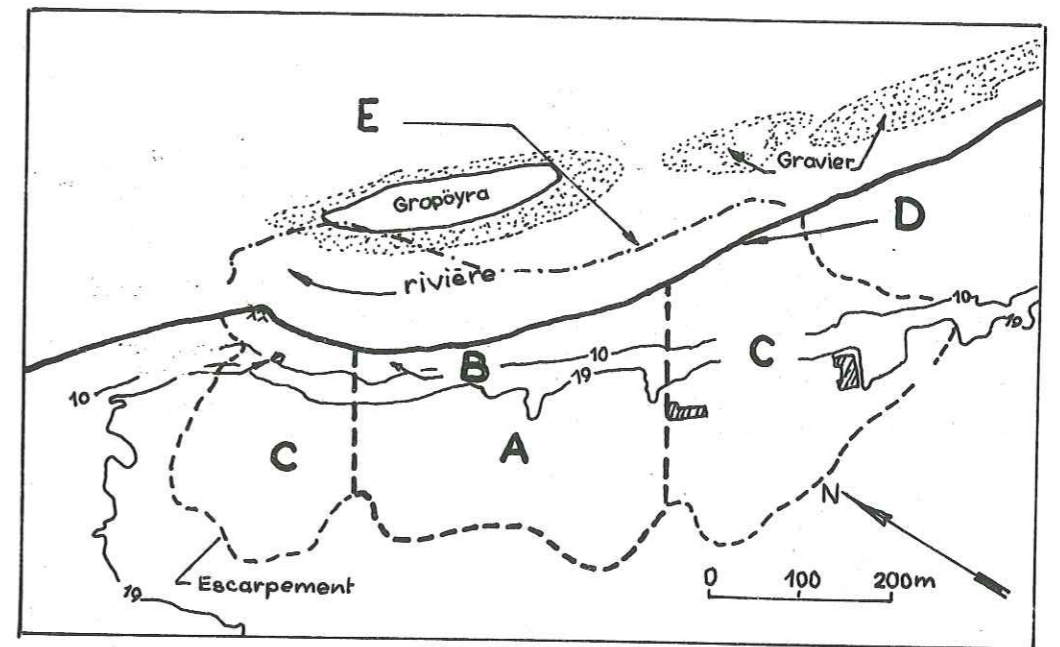


Fig. 55a: Plan du glissement de Furre
 A. Glissement principal
 B. Glissement initial.
 C. Glissements secondaires
 D. Berge avant glissement
 E. Limite de la masse glissée

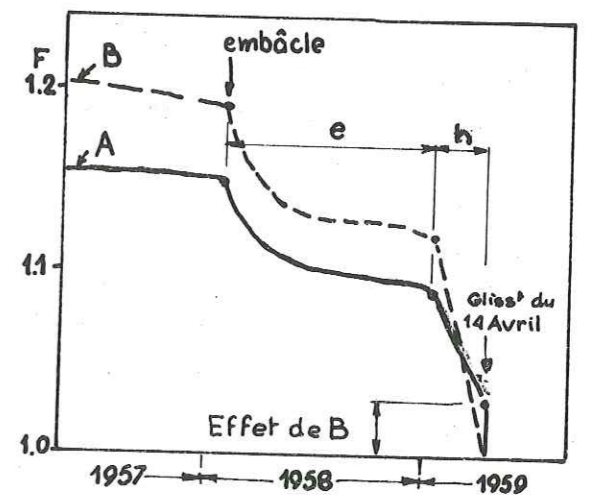
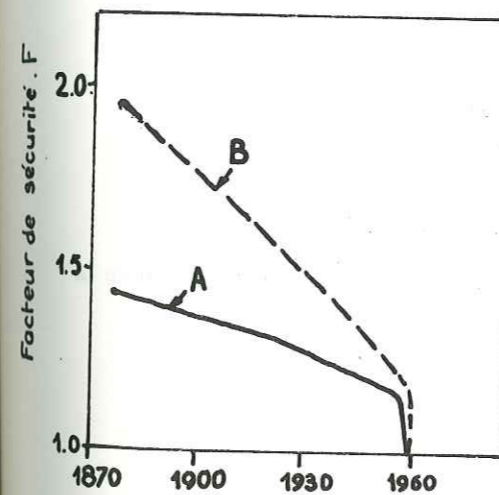


Fig. 55b: Variation du facteur sécurité avec le temps.
 e: Erosion provoquée par l'embâcle. h: hiver humide et dégel.
 A: Courbe du glissement principal. B: Courbe du glissement initial.

d'après J.N. HUTCHINSON

- conditions climatiques des lieux.
- la végétation.
- la géométrie des circulations d'eau superficielles ou souterraines.

b) Les causes finales ou variables, intervenant d'une façon plus ou moins rapide et parfois instantanée dans le déclenchement propre du glissement. Ces causes peuvent être ou non le fait de l'intervention humaine.

- Les suppressions brutales de supports latéraux, frontaux ; ce facteur peut avoir aussi des effets très lents, certaines tranchées taillées dans des argiles de Londres sont restées stables pendant 70 ans malgré l'entaille rapide effectuée par les hommes. Ceci a conduit les ingénieurs à construire des courbes de "vieillessement" des argiles, vieillissement contre lequel il est d'ailleurs pratiquement impossible de lutter efficacement.
- Les vibrations, dont les actions peuvent être instantanées dans le cas de séismes.
- Les surcharges.
- Les actions de l'eau :
 - + orages violents.
 - + infiltrations provoquées.
 - + vidange rapide.

K. TERZAGHI a synthétisé dans un tableau que nous reproduisons, les modes d'action des différents agents ainsi que les modifications apportées aux matériaux et leurs effets sur l'équilibre des versants ou des talus (voir tableau n° 24).

Enfin certains types de mouvement de terrain sont déterminés par tels ou tels agents prédominants, nous les replacerons donc dans le schéma général de classification proposé au chapitre n° 1.

ECROULEMENT

- 1 - CAUSES LOINTAINES.

- Pesanteur : "appel au vide".
- Pente : forte - surplomb.
- Disposition des volumes : couche perméable sur couche imperméable, couche massive et pesante sur couche tendre.
- Fracturation : continue, ouverte, de dimension importante.
- Circulation d'eau : nappe, sources en pied de falaise, infiltration par les fissures ou crevasses.
- Suppression de support : par courants marins, fluviaux (érosion linéaire), par foirage progressif de la couche tendre support.

- 2 - CAUSES FINALES.

- Suppression brutale de support : exploitation humaine.
- Pression d'eau sur les parois des joints et crevasses.
- Gel intense et prolongé.
- Vibrations.

GLISSEMENT PROPREMENT - DIT.

- 1 - CAUSES LOINTAINES.

- Pesanteur (tous les types).
- Pente de la surface topographique (slump, glissement de roches, de blocs, de débris).
- Disposition des couches (glissement de blocs, de roches).
- Pente de la stratification (glissement de blocs, de roches)
- Fauchage des couches (glissement de débris)
- Nature des matériaux (slump, glissement de débris, rupture par étalement latéral).
- Géométrie des grains du matériau (tous les types).
- Circulations d'eau (tous les types).

- 2 - CAUSES FINALES.

- Suppression de support soit artificielle soit naturelle (tous les types).
- Surcharge naturelle ou artificielle (slump, glissement de débris, rupture par étalement latéral).
- Vibrations (tous les types).
- Infiltrations provoquées (tous les types).
- Vidange rapide de retenue (tous les types).
- Crues rapides (slump, glissement de débris, rupture par étalement latéral).

COULEES

- 1 - CAUSES LOINTAINES.

- Pesanteur.
- Pente de la surface topographique.
- Exposition.
- Nature du matériau : prédominance argileuse, terrain tendre.
- Géométrie du matériau : pourcentage important de grains fins.
- Disposition des différents volumes.
- Pente et forme du substratum : combe synclinale, talweg vif ou mort ou enterré.
- Fissuration de la masse argileuse.
- Ecoulement et ruissellement : affouillement par cours d'eau subséquent.

- 2 - CAUSES FINALES.

- Entaille, artificielle ou naturelle.
- Orages violents, provoquant la saturation rapide.
- Crues de torrent, franchissement de la limite de liquidité.
- Infiltrations provoquées.
- *Choc d'un écoulement*

MOUVEMENTS LENTS SOLIFLUXION - REPTATION.

- 1 - CAUSES LOINTAINES.

- Pesanteur (réptation).
- Pente de la surface topographique.
- Exposition.
- Géométrie interne : couverture peu épaisse.
substratum incliné.
fauchage.
fracturation du substratum.
- Nature du matériau : matériau argileux (solifluxion).
résidus d'altération grossier (reptation).
manteau de débris, éboulis (reptation).
- Conditions climatiques : haute fréquence gel - dégel.
alternance saison sèche - saison humide.
expansion-contraction dues au gel, à la chaleur.
variations journalières de température.
- Végétation : forêt chargeant le versant.

- 2 - CAUSES FINALES.

- Ecoulement superficiel, ameublissement.
- Ecoulement épidermique, franchissement des limites de liquidité et de plasticité.
- Pluies et neige.
- Dilatation du sol par les racines, le gel, la chaleur.
- Entaille.

TABLEAU N°24 - LE MECANISME DES GLISSEMENTS DE TERRAIN (D'après K. TERZAGHI)

CAUSE ou AGENT	CIRCONSTANCES	MODE D'ACTION	MATERIAUX SENSIBLES	MODIFICATION DE L'ETAT INITIAL	EFFETS SUR L'EQUILIBRE DES TALUS
Enlèvement de matériaux	Terrassements ou érosion	1 Augmentation de la hauteur ou de la pente	Tous les matériaux	Modification des contraintes	↗ Contraintes de cisaillement
			Argile dure fissurée Schistes argileux	id + ouverture des fissures	id + début de 8
Tectonique	Mouvements tectoniques	2 Déformation de la croûte terrestre	Tous matériaux	Modification de la pente	↗ Contraintes de cisaillement
Tectonique ou explosifs	Ebranlements naturels ou provoqués	3 Vibrations à haute fréquence	Tous matériaux	Modifications transitoires des contraintes	↗ Contraintes de cisaillement
			Loess. Sables et graviers peu cimentés	↘ Liaisons intergranulaires	↘ Cohésion ↗ contraintes de cisaillement
			Sables moyens ou fins saturés d'eau	Réarrangement des grains	Boulance
Plasticité avec ou sans eau	Existence du versant	4 Déformation plastique du versant	Argile dure fissurée Schistes argileux Zone déjà glissée	Ouverture de fissures anciennes et nouvelles	↘ Cohésion accélération du mode 8
		5 Déformation plastique d'une couche sous-jacente	Matériaux rigides reposant sur matériaux plastiques		
EAU	Pluie et	6 Remplacement de l'air dans les vides	Sable humide	↗ Pression de l'eau interstitielle	↘ Coefficient de frottement
		7 Déplacement de l'air dans les diaclases ouvertes	Roches fissurées Schistes argileux		
		8 ↘ Tension superficielle et gonflement	Argiles dures fissurées certains schistes argileux	Gonflement	

TABLEAU N° 24 (suite)

EAU	fonte des neiges	9 Altération chimique	Toutes roches	↘ Liaisons intergranulaires	↘ Cohésion
	Gel	10 ↗ Volume	Roches fissurées	Elargissement et création de fissures	
		11 Formation et fusion de couches de glace	Limon et Limon sableux	↗ Teneur en eau de la couche supérieure	↘ Coefficient de frottement
	Sécheresse	12 Retrait	Argile	Fissuration	↘ Cohésion
	Vidange rapide d'une retenue	13 Filtration vers le pied du talus	Sable fin et limon	↗ Pression interstitielle	↘ Coefficient de frottement
	Modification rapide du niveau piézométrique	14 Réarrangement des grains	Sables fins non compacts saturés d'eau	↗ Spontanée pression interstitielle	Boulance
	Montée d'une nappe au voisinage	15 Montée du niveau piézométrique	Couche de limon ou sable dans ou sous l'argile	↗ Pression interstitielle	↘ Coefficient de frottement
	Infiltrations provoquées	16 Filtration à travers le talus	Limons saturés d'eau		
		17 Déplacement de l'air des vides	Sables fins humides	Disparition des tensions superficielles	↘ Cohésion
		18 Dissolution d'un ciment	Loess	↘ Liaisons intergranulaires	
19 Erosion souterraine		Sables fins et loess	Creusement sous le versant	↗ Contraintes de cisaillement	

MORPHOLOGIE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN.

I. - LES GRANDES FORMES D'ENSEMBLE.

II. - LES FORMES DE DETAIL.

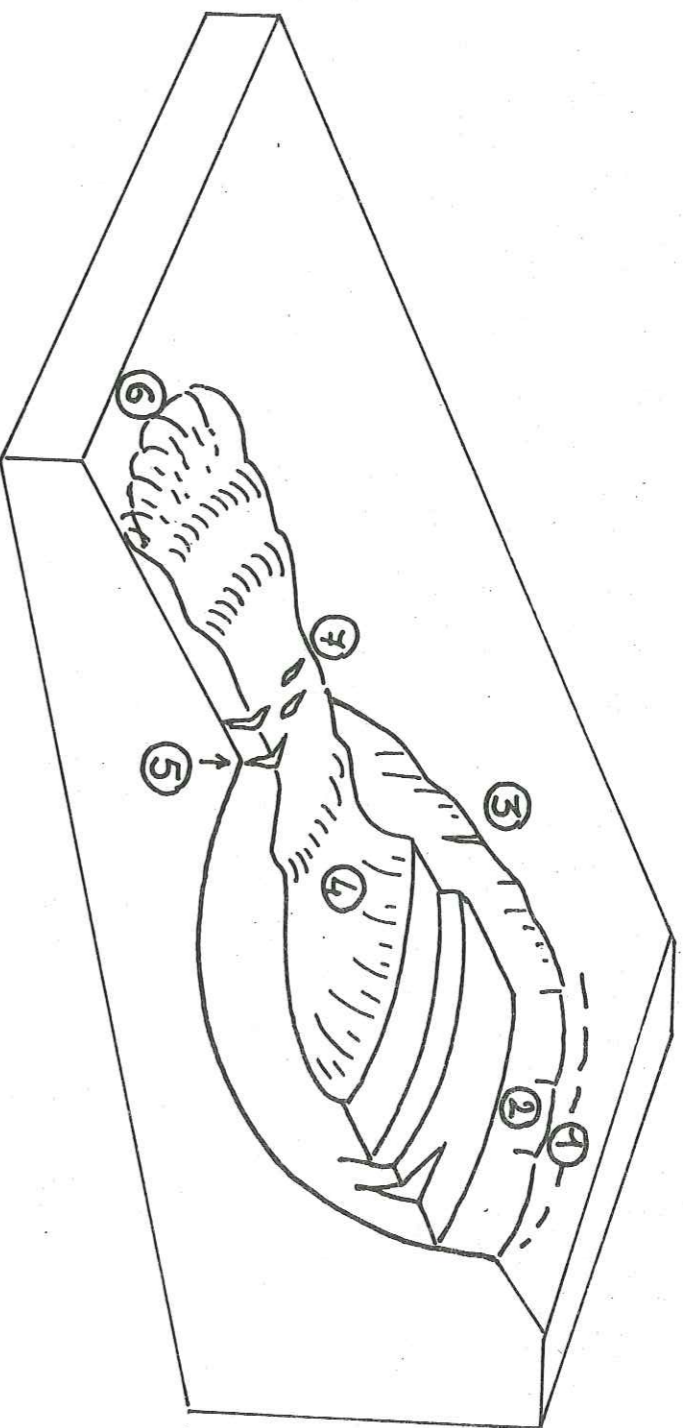


Fig 56. Forme générale d'un glissement (du type slump)

- 1. - Couronne : partie n'ayant pas encore bougée, apparition de fissures rétrogrades.
- 2. - Escarpement ou arrachement principal : intersection supérieure d'une surface de glissement avec la surface topographique.
- 3. - Flancs : bords du glissement.
- 4. - Corps du glissement.
- 5. - Pied du glissement.
- 6. - Pouce (toe)
- 7. - Fissures crevasses transversales.

- INTRODUCTION -

L'instabilité d'une pente se traduit dans la nature par des formes particulières dont l'étude doit permettre d'accéder à une meilleure compréhension des divers phénomènes régissant l'évolution des versants et de faire la part des différents agents de façonnement. La connaissance des formes de mouvements de terrain ainsi que l'étude de la localisation des indices de glissements représentent pour l'ingénieur un excellent outil à la fois de prévision et de prévention. Il pourra délimiter les zones dangereuses, essayer de prévoir les différents stades de fonctionnement du glissement et partant d'orienter son choix pour telle ou telle mesure de correction.

Nous étudierons donc :

- 1 - Les grandes formes des différents mouvements.
- 2 - Les formes de détail : fissures, crevasses.

I°. - LES GRANDES FORMES D'ENSEMBLE.

Tout mouvement de terrain suppose la succession de deux formes caractéristiques (mis à part les écroulements).

- En tête, une dépression (loupe) de forme plus ou moins régulière, de dimensions variables, correspondant au volume des terres déplacées au moment de la rupture principale, et formant fréquemment dans le versant une solution de continuité : un replat.
- Vers le bas, l'amoncellement des matériaux glissés provoque des zones en relief de natures diverses : langues, bourrelets.

En outre, à l'aide d'un schéma général (fig. 56), nous définirons un certain nombre de termes descriptifs attribués couramment dans la littérature anglo-saxonne, aux différentes parties d'un glissement.

a) - La "couronne", partie restée en place, en tête de glissement, lors de la rupture. Elle est néanmoins généralement parcourue, sur une distance variable, de crevasses témoins du recul progressif de l'arrachement principal.

b) - L'arrachement principal ou escarpement principal. Cette surface inclinée concave, limite le glissement à son extrémité supérieure. Au-dessous de cet arrachement principal, il peut exister des escarpements secondaires. Il représente aussi souvent l'intersection avec la surface topographique d'une partie de ou des surfaces de glissement. Ces deux premières formes constituent la tête du glissement ; certains auteurs la définissent plus précisément comme étant la partie où "le matériau se trouve en contact avec l'escarpement principal".

c) - Les flancs sont les limites latérales du glissement, on parle de flanc droit et gauche en regardant dans le sens principal de mouvement.

d) - Le corps du glissement est la partie centrale (formant la loupe) affectée de crevasses - bourrelets - replats.

e) - Le pied correspond à la ligne d'intersection entre la surface de glissement ou d'écoulement et la surface topographique. Cette partie est souvent invisible, car enterrée sous les débris. Dans cette zone se développent souvent des crevasses transverses aux glissements.

f) - "Le pouce" ("toe") est considéré comme l'extrémité la plus inférieure du glissement c'est-à-dire la plus lointaine de l'arrachement principal.

Ces différentes formes, comme nous allons le voir, n'existent pas dans tous les types de glissements.

I°, A - LES GLISSEMENTS ANCIENS D'AGE GEOLOGIQUE.

L'étude des formes d'ensemble nous permet d'introduire ici la notion de glissement ancien qui, dans les Alpes sont d'âge interstadiaire ou postglaciaire. Leur abondance dans les Alpes nous oblige à les mentionner, ils occupent en effet parfois 50 %, et plus, de la superficie de certaines régions et vallées alpines (vallée de l'Arc, de l'Ubaye)

et ont contribué à bouleverser complètement les structures géologiques rendues de la sorte inextricables aux yeux et à l'esprit de nombreuses générations de géologues. C'est le cas en particulier du fameux glissement de Jausiers (Ubaye) dont une des conséquences, parmi tant d'autres, est le décalage du contact anormal de base de la nappe du flysch à helminthoïdes que beaucoup d'auteurs, avant C. KERCKHOVE, avaient représenté, se plissant du haut en bas du versant.

Ces glissements datent soit du recul définitif du glacier encombrant la vallée (glissement postglaciaire) soit encore se sont produits lors de décrues momentanées, plus ou moins prononcées au cours d'un même stade glaciaire (glissement interstadiaire).

Ils ont des formes très caractéristiques de grandes loupes de glissement affectant souvent un flanc entier de montagne. Bien qu'estompées par la végétation, les différentes formes sont reconnaissables. L'arrachement principal est nettement semi-circulaire et correspond la plus souvent à la crête actuelle elle-même ; l'arête sommitale peut d'ailleurs avoir été complètement entraînée dans le mouvement faisant place ainsi à une sorte de col. De nombreux glissements ont entamé la montagne en arrière de leur crête initiale, ils sont responsables aussi de certains dédoublements de crête. Le corps du glissement est marqué nettement dans la topographie par un replat, de dimensions variables, constitué par la masse éboulée et qui porte souvent des villages de montagnes. La zone du pied a une forme convexe ; les débris ont aussi contribué à rétrécir les vallées et même à les barrer complètement permettant à des lacs de s'installer derrière ce barrage naturel. Ces débris ont pu être remodelés ultérieurement par une nouvelle avancée du glacier, ou bien scellés par des dépôts morainiques.

La forme en canon de la vallée du Vajont en Italie serait due à l'encaissement de la rivière dans les débris d'un ancien glissement postglaciaire, ayant obstrué la vallée à partir de la rive gauche, et expliquant ainsi le replat de la cote 850 sur cette même rive gauche (voir figure 57). Il y avait donc là un précédent dangereux tant au point de vue structure d'ensemble que zone de faiblesse préexistante.

Certains glissements d'âge géologique, localisés en milieu de versant, nous renseignent sur la profondeur de la vallée à l'époque de la rupture ; ils se sont déclenchés lors de reculs partiels ou définitifs du glacier principal entraînant par la même occasion des retraits et surplombs des langues affluentes. Les replats ne peuvent alors être interprétés comme de véritables épaulements glaciaires.

Un autre trait caractéristique consiste dans leurs très grandes dimensions, qu'on ne peut comparer à celles des glissements actuels ou de la période historique, à de rares exceptions près ; le glissement de roches de Vajont Longarone (9 octobre 1963) donne une idée de l'ampleur de tels phénomènes, la superficie glissée est de 2 km² avec un front de 2 km et un volume de 300 000 000 m³, l'arrachement principal dominant la retenue de 550 à 700 m.

Tout ceci pose le problème des "glissements profonds", impliquant des surfaces de glissement suffisamment continues, pour qu'il y ait un mouvement d'ensemble de grande amplitude ; elles empruntent aussi bien les plans et joints de stratification que les divers systèmes de fractures du massif.

Pour TERZAGHI, dans le cas d'une vallée découpée, à profondeur modérée, dans une topographie molle, les efforts de cisaillement dans la roche restent faibles, sauf au voisinage immédiat du cañon. Par contre pour les hautes montagnes entaillées par des vallées profondes, la roche sous le versant peut être soumise à des efforts importants, voisins de la résistance au cisaillement et un glissement selon la surface de rupture a b est susceptible de se produire (fig. 58). On ne connaît pas en fait grand chose sur les mécanismes de tels glissements à grande échelle ; on ne sait s'ils se produisent rapidement ou lentement, et si la déformation précédant la rupture est importante.

Des géologues et mécaniciens des roches comme L. MULLER, STINI, PACHER, SCHLEIBAUER, TER-STEPANIAN ont essayé d'approcher le problème dans leurs études sur le processus de "fluage profond des pentes". Les versants élevés sont soumis à une phase plus ou moins longue de "fluage" profond et lent, pouvant précéder une phase de rupture catastrophique et rapide. Dans de nombreux sites de barrages autrichiens, on a trouvé que la roche d'un des versants avançait vers la vallée selon un mouvement horizontal alors que la roche comprise dans ce mouvement restait relativement intacte. Le mécanisme se développerait en trois temps :

- la phase lente d'ouverture de fissures de surtension à la crête du talus (voir fig. 59 a).
- une phase de rupture progressive ("fluage" reptation) avec extension de la fissuration en profondeur et gonflement du talus dans la moitié inférieure de la pente atteignant fréquemment 7 à 8 % de la hauteur du talus, ceci sous l'effet de contraintes diverses et, entre autre, de tassement dû au poids de la roche et de la poussée latérale (59 b).
- une phase de rupture finale de pied de talus, rapide en général (fig. 59 c).

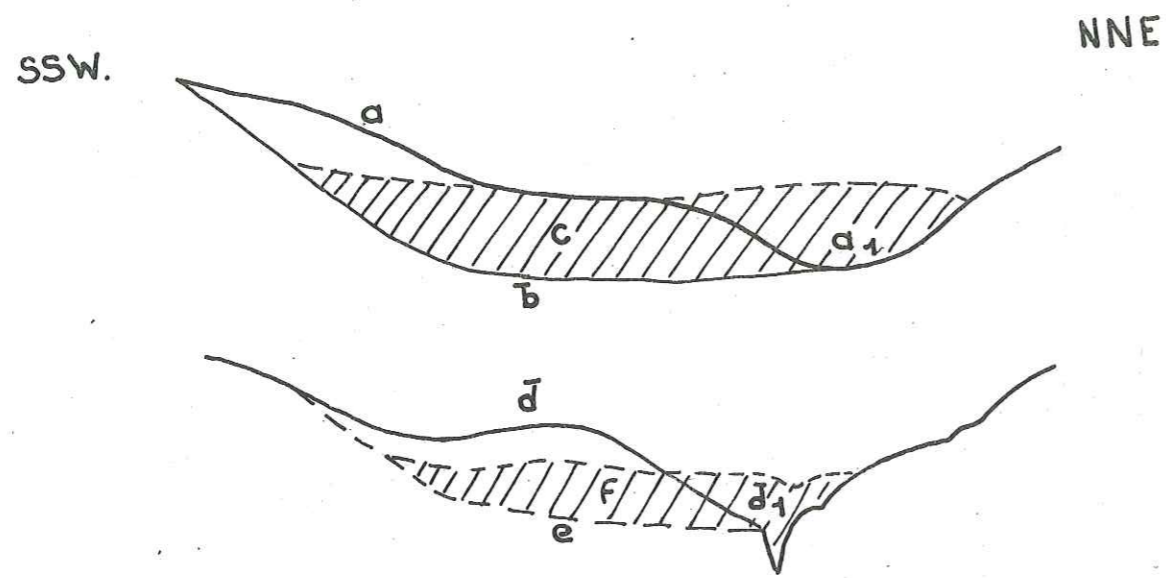


Fig 57. Glissement de Vajont Longarone hypothèse d'un ancien glissement.

- a : Allure de la surface topographique dans les phases jeunes de l'érosion, après la glaciation würmienne.
- a₁ : Gorge du Vajont à cette époque.
- b : Surface de glissement du glissement ancien C
- d..d₁ : Surface topographique avant glissement de 1963.
- e : Surface de glissement du glissement f (1963).

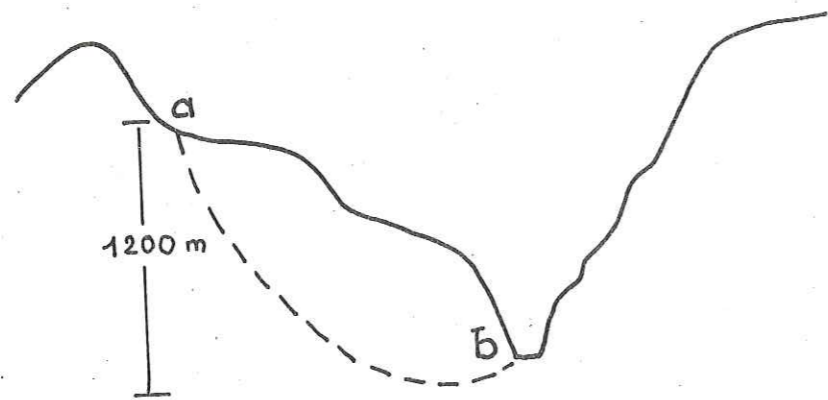


Fig 58. Coupe schématique d'un glissement ancien d'âge géologique.

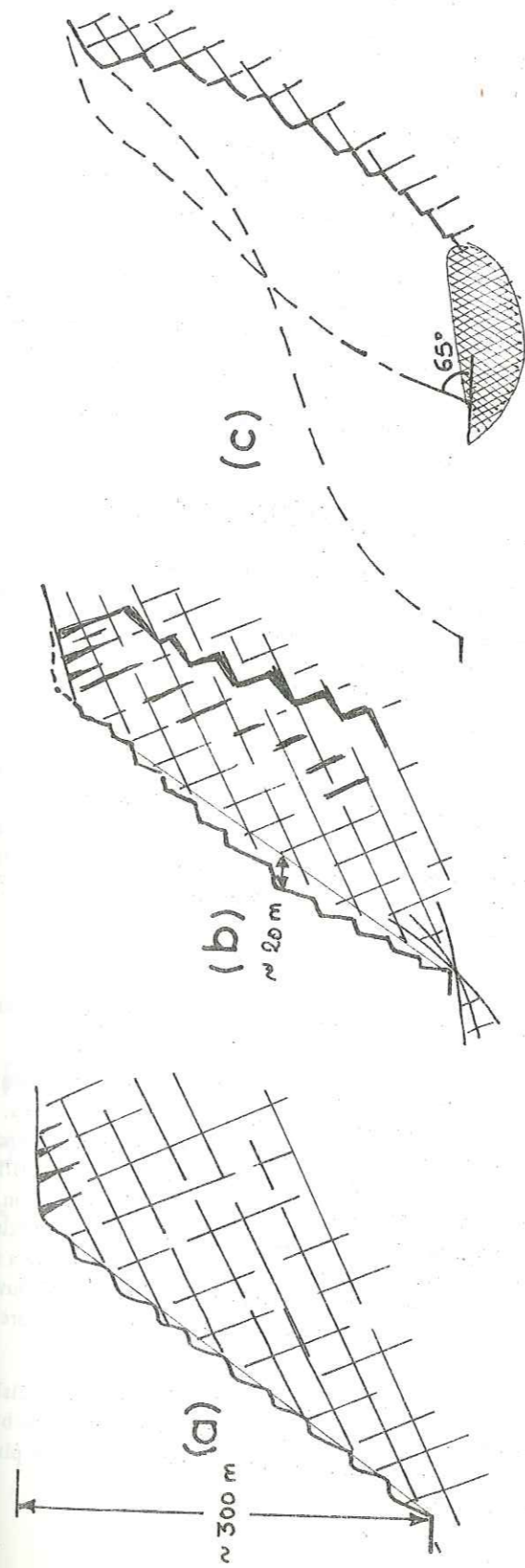


Fig.59a-b-c Evolution d'un talus rocheux abrupt.
 (a) phase d'ouverture de fissures de surtension à la crête du talus.
 (b) phase de rupture progressive, gonflement.
 (c) rupture au pied de talus.

Il n'y aurait donc pas une seule surface de glissement bien définie mais un ensemble de surfaces discontinues (MULLER parle de cavité de rupture), guidant les contraintes à l'extension à l'intérieur du versant, accompagnées de dilatations importantes ; et le système mécanique de tels talus ne doit pas se limiter à l'examen du pied et de la crête, mais aussi à la profondeur de la montagne.

MULLER a rencontré dans une galerie d'un chantier de construction en Espagne, des fissures de surtension horizontales, situées au-dessous du sol de la vallée, et, s'infléchissant pour se relever à une position presque verticale.

Les glissements anciens sont le plus souvent du type "slump" - glissements de roches - glissements de débris et délimitent de véritables bassins versants topographiques avec leur réseau hydrographique propre ; il n'est pas rare non plus de les trouver sous la forme de coulées empruntant les talwegs anciens des périodes interglaciaires. La structure des versants a donc été fortement modifiée selon les cas ; il devient, dès lors, délicat de préjuger de la place initiale de masses rocheuses apparemment saines, mais pouvant tout aussi bien flotter au milieu des débris de glissement. Ainsi à St-Martin de Belleville (Savoie), une galerie de reconnaissance a recoupé plusieurs fois des panneaux de schistes houillers emballés dans de la moraine. En outre, les matériaux ont perdu leur cohésion originelle et se trouvent dans un état passablement divisé, favorisant ainsi un accroissement de la perméabilité secondaire. Enfin de nouvelles zones de faiblesse se sont créées, au cours, et, après, le glissement ; il est alors malaisé de juger de l'équilibre de telles masses.

Ces propriétés particulières expliquent en partie les remises en mouvement partielles que l'on observe fréquemment dans les Alpes sous la forme de coulées et de glissements de débris.

I°, B - LES GLISSEMENTS RECENTS, ACTIFS ET HISTORIQUES.

Les mouvements de terrain, déclenchés dans un passé récent, sont plus faciles à identifier et à expliquer ; n'ayant pas atteint souvent la phase de stabilisation complète, les formes ne sont donc pas ou très peu estompées. Nous ferons remarquer une nouvelle fois qu'un glissement de terrain, en constante évolution, présentera diverses formes, se rattachant à différents types de mouvement, néanmoins nous énumérerons au cours de ce travail les principaux traits morphologiques caractéristiques des groupes définis dans la classification.

I°, B - 1 - Les écroulements.

Ils sont reconnaissables aux accumulations importantes de débris localisés en pied de falaise, la granulométrie n'est pas hiérarchisée comme dans les éboulis de pente classiques, les gros blocs voisinant avec les débris fins.

Ces accumulations ont une forme générale convexe, (alors que les éboulis sont concaves) et présentent fréquemment des bourrelets. Dans les cas d'écroulements importants et encore actifs, l'arrachement principal est souligné nettement par des échancrures fraîches, des fractures béantes limitant les blocs instables. (Ce phénomène est très fréquent sur la plupart des corniches tithoniques dans le domaine vocontien).

I°, B - 2 - Les glissements proprement dits.

L'existence de surface de faiblesse, guidant le mouvement général, confère aux glissements proprement dits des traits caractéristiques suivant le type et la nature du matériau affecté.

a) - Le "slump" n'affecte le plus souvent que des formations meubles. Les limites du glissement sont nettes. L'arrachement principal est disposé en arc de cercle et se trouve souvent accompagné d'une série de fissures, de crevasses localisées en arrière et formant la "couronne". La masse glissée peu fragmentée constitue le "corps" et traduit le mouvement d'affaissement d'arrière en avant. Ce mouvement qualifié de "rotationnel" est identifiable par l'inclinaison que prennent les objets rigides, impliqués dans le glissement et par la pente de la stratification, différente de celle des terrains restés en place. La masse glissée peut se fragmenter lors de mouvements secondaires et présenter ainsi une topographie de graben et horst marécageux (fig. 60 a) (ceci est courant dans les argiles sensibles).

Le recouvrement de la surface topographique à partir du pied est faible, cependant le "slump" est souvent accompagné de coulées plus ou moins longues entraînant les matériaux ameublés et décomprimés lors du premier type de rupture.

b) - Le glissement de blocs, prend la forme de pans entiers de falaise ou de massifs isolés, peu disloqués, complètement séparés de leur paroi originelle, donnant parfois l'impression d'avoir affaire à des sortes de buttes témoins. Il n'y a pas nécessairement basculement des blocs ; l'arrachement principal est en fait un fossé plus ou moins large séparant la paroi-mère de la masse glissée (fig. 60 b).

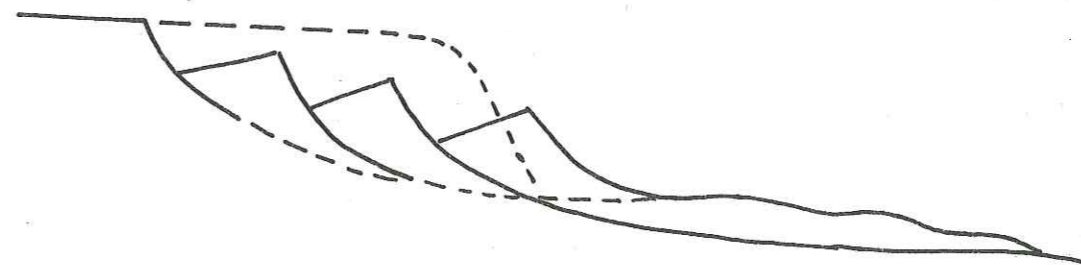


Fig 60a Topographie en "graben" et "horst" dans un "slump".

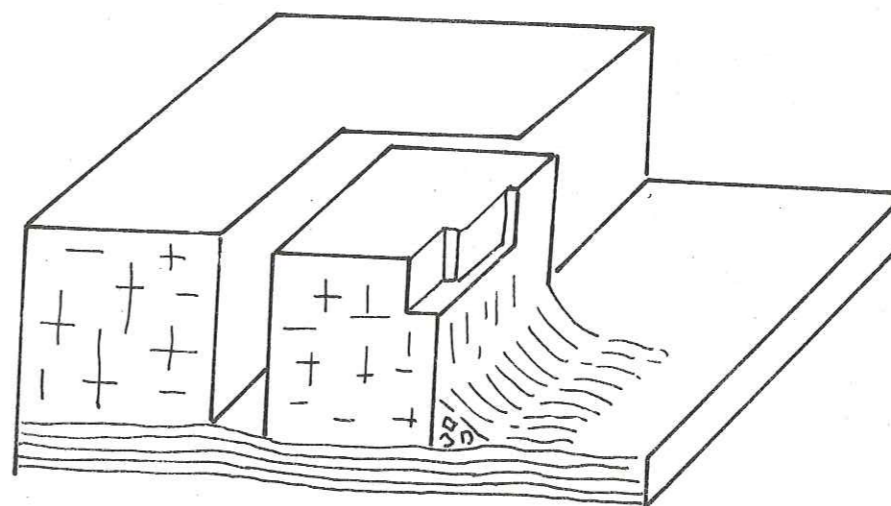


Fig 60b. Représentation schématique d'un glissement de bloc ou de masse rocheuse.

c) - Le glissement de roches, se reconnaît à la présence d'éboulis moutonnés de blocs de tailles diverses ou de strates éclatées formant le pied de massifs stratifiés sillonnés de joints transversaux et à pendage conforme. L'escarpement principal est irrégulier, des strates restant en suspens dans la pente. La surface est en général visible.

d) - Rupture par étalement latéral ; ce type affectant surtout les sols argileux sensibles se traduit par une succession de paquets glissés, qui, selon le mouvement rétrograde, délimitent des sortes de horsts et de grabben évoluant à la longue en coulées. Il peut aussi prendre la forme de bouteille renversée (en plan) le "goulot" étant près de la bordure de la terrasse (voir planche photo à la fin de ce chapitre). fig. 34

I°, B - 3 - Les coulées.

Elles se distinguent nettement des autres groupes de mouvements. A partir de la niche d'arrachement principale semi-circulaire, les matériaux saturés se transforment en langues de boue et de blocs, de forme convexe transversalement au mouvement, à la surface irrégulière accidentée de crevasses, de bourrelets suivant les irrégularités de la surface d'écoulement. Dans certains cas, le torrent générateur de la coulée essaye de se frayer un nouveau passage soit sur les bords, soit au milieu de la langue boueuse occasionnant des formes secondaires telles que les levées de terre, les coulées emboîtées.

Le chenal d'écoulement suivant sa pente, sa largeur peut permettre des divagations, des diffluences, des débordements.

Selon la topographie existante, la pente, la teneur en eau du matériau, le secteur d'accumulation aura des formes diverses. Une coulée du type "mudflow" à matrice fine a tendance à s'étaler dès le moindre replat en formant des "cônes de déjection" très plats, peu épais, couvrant de grandes superficies, avec des possibilités de digitation, (fig. 16). Les coulées du genre "earthflow" à matrice plus grossière forment des bourrelets frontaux épais plus ou moins évasés ; les digitations sont possibles dès qu'il y a accroissement de la pente. Certaines coulées de versant peuvent rester suspendues à la manière de langues glaciaires.

I°, B - 4 - La solifluxion.

Alors que les trois types précédents de mouvement n'affectent en général les versants que d'une façon très localisée, la solifluxion, elle, contribue au façonnement général des pentes sur de grandes étendues, les couvertures morainiques bosselées en sont un exemple. Nous distinguerons deux types de forme :

- les formes généralisées
- les formes localisées.

I°, B - 4-1 - Nous parlerons de formes généralisées dans les cas de solifluxion à grande échelle ; parmi celles-ci on observe le plus souvent :

a) - Les "grandes ondulations" se répétant à intervalle assez régulier. Un versant façonné de la sorte peut paraître plan mais l'observation de détail permet de discerner des bombements évasés, séparés de creux peu profonds. Les arbres sont fréquemment courbés. A la limite, on pourrait considérer ce type comme de la reptation.

b) - Plus nets sont les versants "boursofflés", leur surface est très irrégulière, les bourrelets et boursoufflures désorganisent complètement la topographie préexistante. Les "boursoufflures" apparaissent irrégulièrement dans la pente et ont des dimensions variables. Il n'y a plus seulement déformation plastique (bombement) mais aussi un écoulement de la masse argileuse.

I°, B - 4-2 - Les formes localisées. Les formes localisées de solifluxion sont beaucoup plus nombreuses et diverses ; elles se repèrent d'autant plus qu'elles sont plus spectaculaires. Leur détection est de première importance car elles s'accompagnent toujours de déchirures et d'arrachements.

a) - Les "griffures". Il peut arriver que dans un versant boursoufflé ou à amples ondulations évoluant normalement en reptation, il y ait un secteur où les bourrelets "crèvent", se déchirent en arc de cercle mettant à nu une partie de la couche argileuse de surface. Les "griffures" sont semblables aux "coups de cuillère" des "slumps" mais à une échelle plus réduite. Une fois arraché le matériau se répand et s'étale sous la forme de coulées superficielles.

b) - Les "arrachements et décollements", le matériau au lieu de s'ébouler ou de couler, glisse et se retrouve presque intact quelques mètres plus bas mis à part des craquelures de surface. On peut voir ainsi des plaques de 1 à

2 m d'épaisseur supportant encore leur couverture végétale, glisser plus ou moins loin dans la pente. Cette disposition correspond généralement à la solifluxion d'une tranche de terrain peu épaisse reposant sur un substratum peu profond. De nombreuses formes de ce genre ont été observées dans le Queyras et l'Ubaye lors des crues de juin 1957. Les schistes affleurant dans le Queyras en amont d'Abries ont un pendage conforme à la surface topographique et ils sont recouverts par endroit d'une pellicule de terrains d'altération ; les pluies violentes de juin 1957 ont fourni de l'eau en abondance qui s'est trouvée bloquée au contact schistes - terrain d'altération, et des paquets se sont mis à glisser sur le plan ainsi formé. De tels décollements peuvent aussi correspondre à la limite inférieure des racines d'arbres ce que nous avons pu constater sur les berges rive droite de la retenue de Génissiat dans la région de Léaz (Ain). Ces décollements et arrachements peuvent avoir en extension des dimensions importantes et intéresser de grandes surfaces.

d) - Les formes localisées de pied de versant. Certaines rivières, entaillant le pied de versant, sapent parfois violemment leurs berges lors des crues. Il en résulte des pentes abruptes contrastant avec le reste du versant généralement en pente douce. L'homme en construisant des routes, en faisant des fouilles, contribue à modifier la topographie. Le talus amont des routes est fréquemment plus raide que le reste du versant et supérieur dans bien des cas à l'angle de talus naturel, il y a alors équilibre instable et mise en mouvement.

- ou bien la rupture se fait en une seule fois, on aura alors un décollement pelliculaire par arrachement avec un amas de blocs et de terre glissée ou un décollement par affaissement (affectant souvent et préférentiellement les plates-formes routières) où un panneau se trouve décalé par rapport à un autre en position originelle. L'équilibre du pied de talus est par endroit rétabli momentanément.
- ou bien la rupture se produit en plusieurs fois et provoque ainsi la solifluxion par paquets, le versant étant constitué d'un ensemble de paquets peu épais, délimités par des fissures.

I°, B - 5 - La reptation.

Les versants soumis à la reptation généralisée présentent essentiellement une succession de petites ondulations plus ou moins bien hiérarchisées. La limite de liquidité n'étant pas franchie, il n'y a pas, en principe, de déchirure ou de griffure, tout au plus peut-on voir, sur un manteau de débris donné, des petites cupules d'arrachement. Les objets rigides, implantés dans une pente en reptation, s'inclinent vers le bas du versant. Il en est ainsi des arbres prenant la forme dite "en tuyau de pipe".

II°. - LES FORMES DE DETAIL.

Sous l'effet des contraintes imposées au versant, les matériaux se déforment et se fissurent de diverses façons selon le type et l'intensité de mouvement. Trois formes principales retiendront plus spécialement notre attention :

- les fissures ou crevasses ;
- les bourrelets ou bossellements ;
- les replats.

II°, A - LES FISSURES ET CREVASSES.

TER-STEPANIAN, s'appuyant sur l'exemple classique du "slump" dans les argiles, a proposé une classification mécanique des fissures selon les quatre parties principales du glissement :

- partie supérieure : tête, "couronne".
- partie centrale : corps, pied.
- partie inférieure : pied, pouce.
- parties latérales : flancs.

a) - Les crevasses ou fissures de la partie supérieure ; elles forment la zone de tête de glissement, certaines sont des fissures de traction (fig. 61 a). Les deux lèvres sont alors à la même hauteur et leur écartement est variable. Elles sont souvent disposées en arc de cercle d'où le nom de "lunear cracks".

D'autres traduisent un cisaillement (shear cracks) (fig. 61 b). Elles représentent l'évolution normale de celles citées ci-dessus. Les deux lèvres sont alors décalées. Elles sont plus étendues que les fissures de tension et se rencontrent dans la partie haute de la masse glissée où elles déterminent des escarpements secondaires, témoins d'une évolution progressive ou rétrograde du mouvement.

b) - Les fissures ou crevasses latérales (side-cracks). La zone de contact entre masse en mouvement et partie relativement stable est marquée par une série de fissures ou crevasses longitudinales diverses dont les lèvres sont décalées verticalement. Par rapport à celles des régions supérieures et inférieures du glissement, les fissures latérales sont souvent très irrégulières et non hiérarchisées ; elles sont de quatre types :

+ crevasse de poussée et compression (pushing cracks) (fig. 61 c), se formant quand la direction de mouvement fait un angle aigu avec le bord du glissement, provoquant ainsi un effort de cisaillement et une compression.

+ crevasse de cisaillement et de torsion (squeezing cracks) (fig. 61 d) ; sont l'exagération des précédentes avec formation d'un petit bourrelet.

+ crevasse de cisaillement et de friction (fig. 61 e) se forme quand la direction de mouvement est parallèle au bord du glissement. Les crevasses et fissures de ce type fonctionnent en décrochement ; sur les parois peuvent apparaître des stries de glissement (slickensides). ce type de crevasse peut s'ouvrir avant l'effort de cisaillement sans donner de lignes ou stries de mouvement "separation cracks" (fig. 61 f).

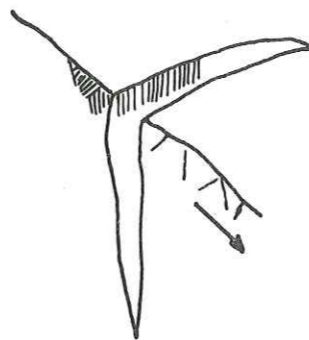
c) - Les crevasses centrales sont transversales à la direction de mouvement.

+ certaines de celles-ci peuvent être fermées, soulignées par un ou plusieurs bourrelets de faible épaisseur. Ces fissures de compression (smashing cracks) se situent dans la région où le glissement, ou la coulée, rencontre un obstacle (fig. 61 g).

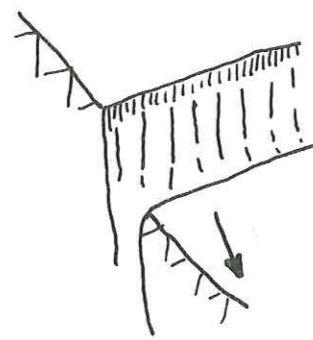
+ d'autres sont ouvertes (opening cracks) (fig. 61 h) et sont dues à la traction : elles se créent aux endroits où la masse glissée chevauche un obstacle, ce dernier type est fréquent dans les "slumps earthflows" à la verticale du pied de glissement.

d) - Les crevasses et fissures inférieures (fig. 61 i) se forment à l'extrémité de la langue ou des digitations de glissement. TER-STEPANIAN en fait des crevasses fermées dont l'un des bords (sup.) chevauche le bord inférieur enseveli sous les matériaux glissés. Il semble que l'on puisse les assimiler aux bourrelets frontaux dont nous allons parler à la suite de ce chapitre.

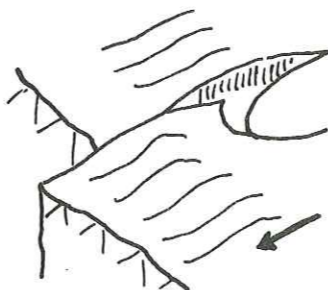
Enfin d'autres types de crevasses commandées par la structure (faille etc...) et par la nature du matériau (fentes de dessiccation) peuvent évoluer également en crevasses de glissement. Nous avons résumé dans le tableau n° 25 l'apparition des différents types de fissures en fonction du mode de mouvement.



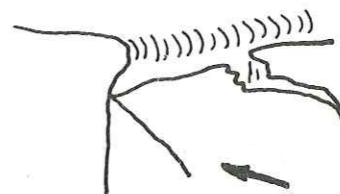
61 a: Fissure supérieure
Fissure de traction



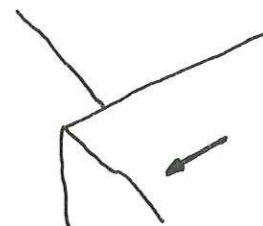
61 b: Crevasse supérieure
Cisaillement



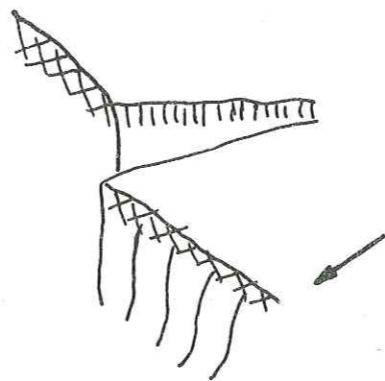
61 c: Crevasse latérale
Poussée et Torsion



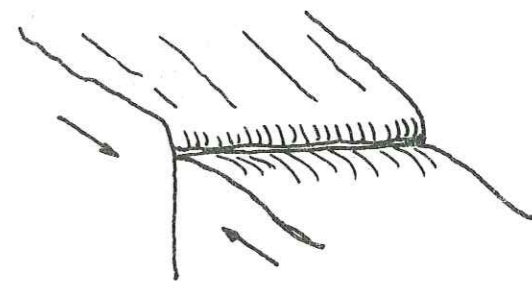
61 d: Crevasse latérale
Compression



61 e: Crevasse latérale
Cisaillement



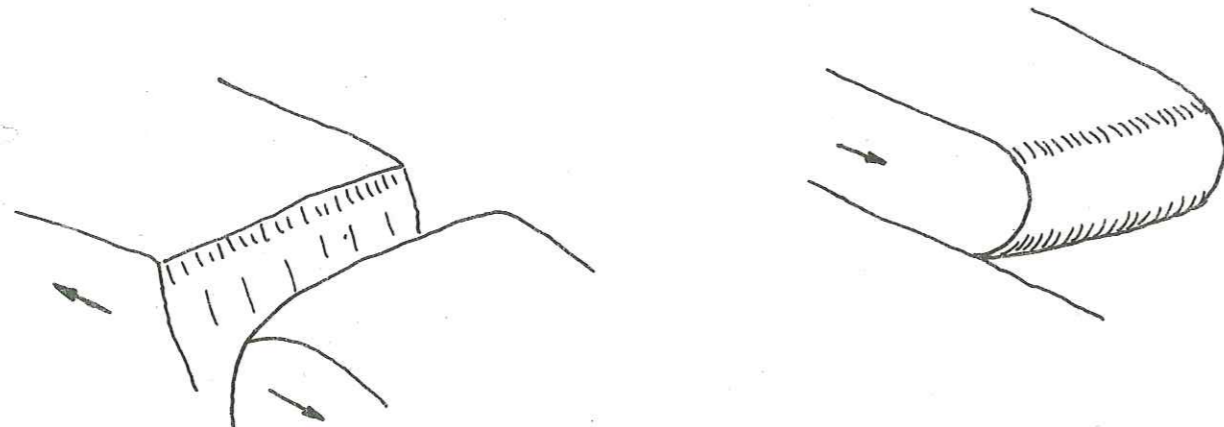
61 f: Fissure de cisaillement



61 g: Crevasse centrale
Crevasse de compression

TABEAU N° 25 - REPARTITION DES FISSURES DANS LES DIFFERENTS TYPES DE MOUVEMENT

Types de mouvement	a (1)	b	c	d	e	f	g	h	i
Ecoulement	+								
"Slump"	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Glissement de roches	+	+			+	+			
Glissement de blocs	+	+							
Glissement de débris	+	+			+	+			
Rupture par expansion latérale.	+	+	+	+	+	+	+	+	
Coulée du type earthflow	+	+					+	+	+
Coulée du type mudflow	+	+	?				+	+	+
Solifluxion	+	+					+	+	+



61h: Crevasse centrale.
Tension.

61i: Crevasse basse.
Bourrelet.

Fig 61a-i: Principaux types de fissures et crevasses

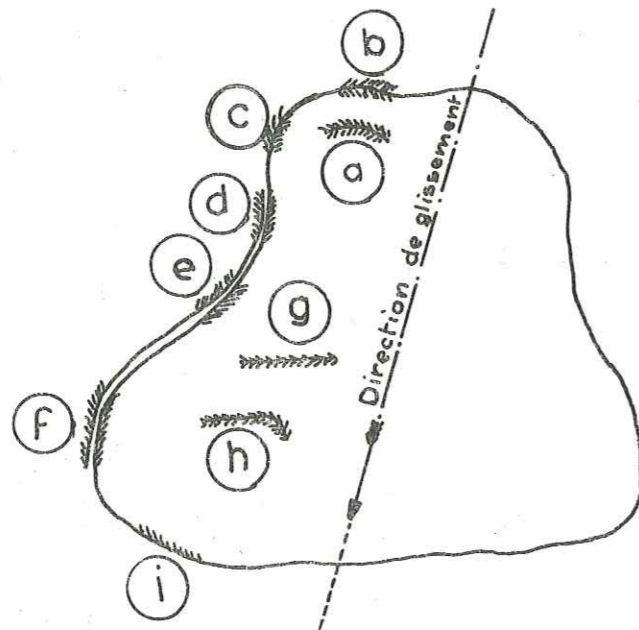


Fig. 62: Principaux types de fissures et crevasses en plan

II°, B - LES BOURRELETS ET REPLATS.

Ils sont extrêmement fréquents dans tous les mouvements englobant des terrains meubles et représentent les véritables témoins des déplacements. On les trouve dans tous les types de mouvement et plus spécialement dans les coulées, les glissements de débris, la solifluxion et la reptation. Ils ne sont pas rares dans les débris d'écroulement.

Leur forme générale est convexe, à pente plus ou moins forte selon les cas. Ils déterminent en amont et en aval des replats. Plusieurs types sont à distinguer selon leur importance, leur disposition dans la pente.

a) - Les petits "bossellements réguliers".

Ce sont des successions de petits talus raides, disposés en arc de cercle. Leur hauteur maximum varie entre 0,5 m et 3 à 5 m. Au pied des bourrelets se trouvent des replats se raccordant au talus par une concavité. Les replats sont en général humides, marécageux tandis que le bourrelet lui-même reste sec la plupart du temps. Ces formes sont fréquentes dans les coulées argileuses ; lors de périodes sèches, le haut et le pied du bourrelet se fendillent favorisant ainsi l'infiltration et la reprise de mouvement lors des saisons pluvieuses.

b) - Les grands "bossellements irréguliers".

Leurs dimensions sont plus importantes ; ils peuvent avoir 20 à 50 m de long et parfois plus, leur hauteur varie de 5 à 20 m. Leur pente moyenne est de 15 à 30°. La surface topographique montre une succession de zones relativement plates et de bourrelets. Dans les coulées, de tels bourrelets sont en général constitués d'amas de blocs, enrobés dans une matrice argileuse, alors que sur les replats, dominent les matériaux fins.

(1) - Les colonnes a-b.....i correspondent aux types de fissures et crevasses décrites dans les figures 61a à 61 i.

c) - Les terrasses de solifluxion.

Ce type de bourrelet est fréquent dans les régions soumises à un climat périglaciaire (Norvège - Alaska - Russie) ou d'une façon générale dans les régions situées à haute altitude avec présence de névés tardifs. Ces bourrelets, à pente raide, sont de formes et de dimensions variables ; la plupart du temps ils sont lobés, la hauteur varie entre 1 et 3 m. Ils se succèdent à intervalle moyen de 10 à 100 m, mais cette distance peut varier considérablement, elle diminue quand la pente augmente ; par contre la hauteur des bourrelets augmente avec la pente.

Dans les régions à névé tardif, les norvégiens pour leur part, surveillent la formation de bourrelets isolés (terrasses isolées, terrasses dites de solifluxion) au front de la plaque de neige. Ce sont des formes assez réduites, dues à la percolation de l'eau de fonte dans le sol et à l'augmentation de la pression interstitielle.

d) - Les formes de reptation.

En pays tempéré humide, la reptation se reconnaît, outre la courbure des arbres, à la présence de bossellements, assez plats, de hauteur faible 0,5 à 1 m au maximum, faits d'une série de petits bombements élémentaires. Dans les régions soumises à des périodes de gel important, l'instabilité se traduit par une série de micro-reliefs. R. S. SIGAFOOS et D. M. HOPKINS, lors d'étude de construction de routes en Alaska ont rencontré le plus souvent trois formes principales de bourrelets :

+ les terrasses ou bourrelets "aplatis" (soil terraces). Ce sont des bourrelets en forme de marches d'escalier dus aux mouvements du sol sur des pentes de 5 à 15°. La hauteur de ces marches varie entre 1,5 et 6 m et elles s'étendent parallèlement au versant sur des longueurs de 90 à 1000 m. Le pied de talus est marqué comme pour les autres formes de sources et de suintements. La vitesse de mouvement est très faible, le front du bourrelet avance d'environ 0,5 par an. La reptation thermique est l'agent dominant, mais localement il peut y avoir des petites coulées ; un substratum gelé en permanence n'est pas nécessaire à la formation de telles terrasses, néanmoins il accélère considérablement le phénomène.

+ les terrasses lobées (lobate terraces - lobate benches). Sur une pente de 5 à 20°, le bourrelet complet est découpé en de nombreux petits escarpements secondaires, hauts de 0,30 à 1,50 m. L'escarpement principal est raide ou même chevauchant et limite des surfaces planes de 5 à 10° de pente, chaque lobe secondaire fait 6 à 30 m de large. Les terrasses sont espacées d'une quinzaine de mètres environ, elles sont constituées de sable argileux et de blocs, les blocs soumis au gel se déchaussent et tombent au pied du talus. Ces formes peuvent rester stables pendant de longues périodes, entrecoupées de périodes d'activation courtes, où le déplacement maximum serait de l'ordre de 30 cm au maximum. Ces déplacements ont lieu pendant les saisons humides (dégel - pluies). Les terrasses lobées sont dues à la fois à la reptation des débris sur un substratum peu profond et incliné et à une solifluxion lente provoquant des petites coulées le long de l'escarpement du bourrelet. Un certain nombre de critères permet de différencier les deux agents :

- les terrasses formées par la reptation sont en général plus grandes, moins espacées et plus régulières que celles dues à la solifluxion ;
- la solifluxion domine là où le drainage est difficile ;
- la surface des terrasses, dues à la reptation, est dénudée et couverte de craquelures tandis que les lobes de solifluxion sont gazonnés et unis.

L'allure de la pente de ces différentes formes de bourrelets peut renseigner utilement sur leur évolution en cours.

- un profil concave oblique indique une stabilisation temporaire ;
- un aspect chevauchant indique au contraire une remise en mouvement prochaine, le bourrelet pouvant alors s'écouler ou se détruire en partie par une série d'arrachements dans la zone en surplomb.

TAB. N° 26 - FORMES ET INDICES CARACTÉRISTIQUES DES GLISSEMENTS ACTIFS -

TYPE DE MOUVEMENT	PARTIES STABLES ENTOURANT LE GLISSEMENT			PARTIES INSTABLES GLISSÉES			
	COURONNE	ESCARPEMENT PRINCIPAL	FLANCS	TÊTE	CORPS	PIED	BOUT (toc)
ÉCOULEMENT	- Roches disjointes, crevasses possibles en arrière de l'escarpement principal. - Forme irrégulière	- Habituellement vertical irrégulier démodé, aspect frais. - Surface de failles ou de joints	- La plupart du temps, crêtes dénudées.	- Tête pas bien définie.	- Surface irrégulière de l'amas de débris (dépressions - directions de mouvement radiales)	- enroulé sous les matériaux éboulés.	- Si écoulement petit = amas de débris - Si écoulement important = ride frontale.
SLUMP	- Nombreuses crevasses à courbure concave	- Pente - dénudé - concave - assez élavé. - Présence possible de stries ou cannelures.	- Présence possible de stries - de crevasses en "escalon"	- Replat mares - Présence de crevasses transversales et d'escarpement secondaires.	- Crevasses longitudinales et transversales - Rides de compression, bourrelets	- Rides de compression transversales - Zone de soulèvement - Arbres couchés vers le bas du versant.	- Forme en lobe, bourrelets - Présence de coulée (slump earthflow).
GLISSEMENT DE ROCHES	- Roches décomposées crevasses - fissures	- Pente habituellement - Peu-être plan, surface irrégulière dans la partie supérieure.	- Irréguliers	- Nombreux blocs de roches	- Surface irrégulière, nombreux blocs, ou strates éclaircies.	- Pas de pied	- Accumulation de roches, éboulis crus.
GLISSEMENT DE BLOCS	- Crevasses verticales	- Vertical dans la partie supérieure - Presque plat dans la partie basse	- Escarpements latéraux très bas	- Relativement peu dérangés	- Habituellement un seul ou peu d'éléments glissés - Les crevasses ont très peu de stries.	- Pas de pied - Pas de zone de soulèvement	- Aspect labouré de la surface du sol.
GLISSEMENT DANS ANGLE SENSIBLE	- Crevasses dans cas de mouvement rétrogradé.	- Vertical - peu élavé - Forme circulaire en plan	- Verticaux, peu élevés, continus depuis l'arête - ment principal.	- Replat bien défini	- Plat à surface irrégulière - Étrangement avant le pied - Étalement des matériaux	- Finement sous coulée argileuse - Limité en extension	- Forme lobée coulée peu épaisse
COULÉES "SÈCHES" DE FRAGMENTES DE ROCHES	- Idem écoulement	- Idem écoulement	- Idem écoulement	- Pas de tête nettement définie	- Surface irrégulière ; fragments de roches s'étendant très loin dans les vallées - Formes lobées transversales.	- Pas de pied	- composé de petites languettes
COULÉES DE SABLE DE LOESS	- Pas de crevasses	- Forme d'entonnoir	- Courbes continues depuis l'escarpement.	- Pas de tête généralement	- Amas conique de sable égal en volume à l'amas initial de tête.	- Pas de pied	-
COULÉES DU TYPE EARTHFLOW	- Quelques crevasses	- Concave dans la direction de mouvement. - Forme semi-circulaire à cir. adre.	- Pente.	- Consiste habituellement en un slump	- Chenal d'écoulement - Surface irrégulière rides transversales crevasses.	- Pas de pied.	- Lobes -cf. slump).
COULÉES DU TYPE MUDFLOW	- Quelques crevasses	- Raide, concave - Plusieurs formes : circulaire - rectangulaire forme de bouteille.	- Convergent dans la direction de mouvement (cristice étroit).	- Pas nettement définie ; peut consister en un slump	- Étalement important - Surface irrégulière	- Pas de pied	- Étalement en forme de lobes - Digitations

TABLEAU N° 27 - FORMES ET INDICES DES MOUVEMENTS SUPERFICIELS ET LENTS -

TYPE	FORMES DE DETAIL
Solifluxion généralisée en pays froid.	<ul style="list-style-type: none"> - Bourrelets de pied de névé, de forme irrégulière. - Petites terrasses se succédant tous les 50 à 500 m, en relation souvent avec le réseau hydrographique de surface.
Solifluxion généralisée en pays tempéré.	<ul style="list-style-type: none"> - Amples ondulations plus ou moins évasées ; arbres souvent recourbés ; déformation plastique lente. - Boursouflures, aspect chaotique du versant affecté. Succession irrégulière ; pente de la boursouflure : faible, terminée en général par un talus raide. Dénivellation de quelques décimètres à quelques mètres. Arbres penchés, déformation plastique plus rapide.
Solifluxion localisée en pays tempéré	<ul style="list-style-type: none"> - Griffures - "coups de cuillère" - déchirures en arc de cercle, disposition irrégulière. Des petites coulées peuvent s'en échapper, franchissement localisé de la limite de liquidité. - Arrachement en loupe - petit slump de talus de route ; mouvement assez rapide. Formes diverses irrégulières - souvent circulaires. - Décollement de plaques peu épaisses. - Décollement par paquet, en marche d'escalier.
Reptation	<ul style="list-style-type: none"> - Petites terrasses lobées, persillées, hautes de 0,9 m à 6 m, parallèles aux contours du versant. Parfois forme semi-circulaire. Succession régulière sur des pentes de 5° à 20°.

CHAPITRE IV

METHODE D'ETUDES DES MOUVEMENTS DE TERRAIN.

ESSAI METHODOLOGIQUE

- I. - DESCRIPTION GEOLOGIQUE REGIONALE.
- II. - DESCRIPTION GENERALE DU SITE.
- III. - DESCRIPTION PRECISE DU GLISSEMENT.
- IV. - CAUSES PROBABLES DU GLISSEMENT ETUDIE.
- V. - AGE - PERIODICITE.

- INTRODUCTION -

Au cours d'études de stabilité de versant effectuées pour le compte de différentes administrations, nous avons été amené à élaborer une méthode de travail spécifique permettant de collationner d'une façon logique les observations et les renseignements de tous ordres nécessaires à une meilleure compréhension des mécanismes de mouvement. Bien que chaque glissement de terrain soit un cas d'espèce, nous avons essayé de normaliser certaines techniques d'observation et d'étude d'un usage trop peu courant en France nous semble-t-il.

Lors de ses calculs, études et estimations, le mécanicien du sol a trois préoccupations principales.

- La condition générale représentant la pesanteur agissant sur toutes les catégories de matériaux.
- Les propriétés mécaniques simples du matériau permettant de définir les premiers paramètres des lois rhéologiques.
- Les conditions aux limites résultant de la géométrie du matériau et des contraintes auxquelles il a été ou est encore soumis.

Le géologue par un travail d'observation et grâce à ses connaissances sur l'histoire du site géologique auquel appartient le sol ou la roche fournira les éléments utiles à l'élaboration d'hypothèses de travail conduisant à la solution finale. Il interviendra notamment au stade de l'étude des conditions aux limites, en apportant les précisions sur la disposition du matériau à l'intérieur du versant, sur la fissuration dont il est l'objet, sur sa constitution interne, sur les circulations d'eau dont il est le siège, sur les contraintes qu'il a subies au cours des différentes périodes géologiques.

En outre la pétrographie et la minéralogie qualitative et quantitative sont nécessaires à la compréhension et à l'interprétation des propriétés mécaniques.

Dans le cadre de l'étude des glissements nous nous efforcerons de suivre ce mode de pensée et nous le ferons par approximations successives, suivant le schéma défini ci-après.

La liste des caractères énumérés ci-dessous peut paraître excessive. En fait nous avons réunis dans ce schéma d'étude, d'une façon exhaustive, toutes les données utiles à la compréhension des divers types de mouvements de terrain. Il est évident que leur importance variera en fonction des problèmes posés : étude statistique, étude préventive, contrôle d'un glissement actif. De plus comme nous l'avons déjà dit, le collationnement de tous ces paramètres se fera par approximations successives au fur et à mesure de l'avancement des reconnaissances et des travaux (des compléments utiles peuvent être apportés au cours des travaux de stabilisation) et en fonction des disponibilités financières.

D'autre part, le cadre topographique de l'étude peut être considérablement réduit lorsque l'on a affaire à un petit glissement du type solifluxion localisée d'une plate-forme routière par exemple, de façon à aboutir rapidement au choix des mesures correctives ou préventives à mettre en œuvre. A cet effet, la fiche simplifiée d'étude de glissement que nous annexons à la fin de ce chapitre doit permettre d'arriver à ce résultat dans les meilleurs délais.

Mais par contre, nous estimons que les données géométriques, mécaniques, hydrogéologiques et surtout cinématiques sont nécessaires à l'étude rigoureuse d'un glissement notamment s'il revêt une grande importance économique.

Nous profiterons aussi de ce chapitre sur la méthodologie pour introduire quelques notions sur la périodicité des mouvements.

I° - DESCRIPTION GEOLOGIQUE REGIONALE RAPIDE.

II° - DESCRIPTION GENERALE DU SITE OU DU VERSANT.

II°, A - Localisation.

II°, B - Géométrie actuelle du site.

II°, B - 1 - Géométrie externe actuelle (morphologie)

- Topographie : + altitudes
+ pentes moyennes
+ profil général du versant
+ exposition.
- Géomorphologie :
+ formes représentatives de la région.
+ répartition de ces formes.

II°, B - 2 - Géométrie interne actuelle.

- Lithologie, stratigraphie :
+ description des terrains
+ mode de dépôt
+ pente
+ surface de contact.
- Description des grandes formes structurales générales.
- Géométrie de la fracturation (tectonique descriptive depuis la microfissuration jusqu'aux grands accidents régionaux).
- Géométrie des grains du matériau (sédimentologie)
+ formes des grains
+ statistiques des dimensions
+ orientation des grains.
- Géométrie de l'assemblage.
+ type de l'assemblage
+ proportion de ciment
+ nature du ciment
+ indice de vide
+ densité
+ teneur en eau
+ porosité.

II°, B - 3 - Géométrie des circulations d'eau (hydrogéologie descriptive).

- Ruissellement de surface :
+ nature
+ débits moyens
+ direction d'écoulement
+ transport solide
+ supérieur ou inférieur à l'infiltration.
- Suintements, sources :
+ localisation
+ débits moyens et variations
+ direction d'écoulement.
- Infiltration, zones de stagnation :
+ importance
+ contours
+ répartition et pourcentage.

- Nappes :
 - + type
 - + nombre
 - + contours
 - + variations du niveau piézométrique.
- Plans d'eau libre :
 - + naturels
 - + artificiels (retenue de barrage).
- Ecoulements artificiels.

II°, C - Nature pétrographique et physico-chimique du matériau.

- II°, C - 1 - Nature pétrographique.
- Principaux constituants minéralogiques, grains et matrices.
 - Pourcentage des différents constituants.
 - Pourcentage carbonate - argile.

- II°, C - 2 - Nature chimique.
- Pourcentage sels solubles - sels insolubles.
 - Nature des corps.
 - Analyse du milieu liquide.

- II°, C - 3 - Nature électrique.
- Résistivité.
 - Conductivité.

- II°, C - 4 - Nature thermique.
- Effets du froid (gel).
 - Effets de la chaleur (dessiccation).

II°, D - NATURE MECANIQUE DU MATERIAU.

- II°, D - 1 - Identifications.
- Poids spécifique
 - Teneur en eau
 - Limites
 - Indice de vide
 - Porosité et perméabilité.

- II°, D - 2 - Les essais de résistance.
- En laboratoire
 - In situ.

II°, D - 3 - Les essais dynamiques.

II°, E - DONNEES CLIMATIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES. (hydrogéologie évolutive)

II°, E - 1 - Données climatiques.

- Pluviométrie.
 - + moyennes annuelles, mensuelles
 - + averses (intensité).
- Nivométrie.
- Température.
 - + moyennes
 - + intensité cycles gel-dégel.

II°, E - 2 - Données hydrogéologiques évolutives.

- variations de débit.
- variations de niveau piézométrique.

II°, E - 3 - Végétation.

II°, F - HISTOIRE GEOLOGIQUE DU SITE.

II°, F - 1 - Histoire de la géométrie.

- Tectonique évolutive.

II°, F - 2 - Histoire fluviatile.

II°, F - 3 - Histoire glaciaire.

II°, F - 4 - Histoire de l'altération.

II°, F - 5 - Histoire sismique.

II°, F - 6 - Interventions humaines.

III° - DESCRIPTION PRECISE DU GLISSEMENT.

III°, A - LOCALISATION DU GLISSEMENT ET HISTORIQUE.

III°, B - GEOMETRIE DU VOLUME EN GLISSEMENT.

III°, B - 1 - Géométrie externe.

- Dimensions du glissement, superficie.
- Limites morphologiques du glissement.
- Allure générale de la surface du sol, fissures etc...

III°, B - 2 - Géométrie interne.

- Disposition des couches.
- Surface (s) de glissement.
 - + position
 - + nombre
 - + nature
 - + forme générale et de détail.
- Dans quel matériau le glissement a-t-il lieu.
- Fracturation.
- Façon dont le matériau se rompt ou glisse.
- Volumes instables, dangereux.
- Limites profondes du glissement.

III°, C - TRANSFORMATIONS DU MATERIAU AU COURS OU APRES LE GLISSEMENT.

III°, C - 1 - Transformation dans la géométrie interne.

- Disposition des couches.
- Géométrie du matériau en glissement.

III°, C - 2 - Transformation dans la nature et les propriétés.

III°, D - COMPORTEMENT HYDROGEOLOGIQUE PROPRE AU GLISSEMENT.

III°, D - 1 - Sources et zones de suintement.

- Nombre.
- Localisation.
- Débit et direction d'écoulement.

III°, D - 2 - Ruissellement.

- Importance par rapport à l'infiltration (inférieur ou supérieur).
- Débits.
- Ecoulements détournés, favorisés, obstrués par le glissement.

III°, D - 3 - Zones d'infiltration.

- Nombre.
- Localisation.
- Superficie, répartition.

III°, D - 4 - Eau souterraine.

- Nature de la ou des nappes.
- Variations de niveau.
- Présence de poches, de lentilles.

III°, E - CINEMATIQUE DU GLISSEMENT.

III°, E - 1 - Déplacements horizontaux et verticaux en fonction du temps.

- Secteurs actifs, calmes.
- Statistiques des déplacements.

III°, E - 2 - Vitesses et accélérations.

III°, E - 3 - Périodicité.

- Suivant pluviométrie.
- Suivant variation du niveau piézométrique.
- Suivant variation du plan d'eau libre.
- Suivant les cycles gel - dégel.

IV°, - CAUSES PROBABLES DU GLISSEMENT.

IV°, A - CAUSES LOINTAINES.

IV°, B - CAUSES FINALES.

V° - AGE DU GLISSEMENT.

V°, A - GLISSEMENT ANCIEN GEOLOGIQUE.

V°, A - 1 - Etat.

- Stabilisé.
- Remise en mouvement partielle, complète.

V°, A - 2 - Rapport avec la topographie actuelle.

- Replats.
- Formation de barrage naturel.
- Glissement entaillé par rivière.
- Crête décalée.

V°, B - GLISSEMENT ANCIEN HISTORIQUE.

V°, B - 1 - Etat.

V°, B - 2 - Rapport avec la topographie actuelle.

V°, C - GLISSEMENT RECENT.

V°, C - 1 - Date et historique.

V°, C - 2 - Etat.

VI° - CLASSIFICATION.

- Ecoulement.
- Glissement proprement dit.
- + "slump"

- + glissement de roches.
- + glissement de blocs ou de masses rocheuses.
- + glissement de débris.
- + étalement soudain.
- Coulée.
 - + coulée de blocs.
 - + coulée boueuse : type "earthflow" ou "mudflow".
- Solifluxion.
 - + généralisée.
 - + localisée.
- Reptation.

VII° - REMEDES.

VII°, A - CHANGEMENT DE SITE.

VII°, B - MESURES CONFORTATIVES.

VII°, C - DRAINAGE.

VII°, D - STABILISATION DES SOLS PAR VOIE CHIMIQUE.

VII°, E - REBOISEMENT.

VII°, F - METHODE SPECIALE.

VII°, G - ENLEVEMENT DE MATERIAUX.

I° - DESCRIPTION GEOLOGIQUE REGIONALE -

Elle a pour but de replacer le versant dans son contexte géographique et géologique. On fera donc mention rapidement des différentes unités géologiques, aussi bien lithologiques que tectoniques, constituant l'ossature générale de la région et commandant la morphologie. On en déduit alors les grands traits structuraux : reliefs conformes, inverses, dômes anticlinaux, synclinaux, zones d'effondrement, plateaux, "cuesta", terrasses, etc.,.

Les études lithologiques et historiques porteront surtout sur la détermination, la localisation des terrains de couverture et du substratum et leur mise en place.

Dans le cas d'un glissement isolé, localisé, ce premier stade d'investigations est destiné à souligner sommairement, sur la carte géologique au 1/80 000 ou au 1/50 000, les premiers éléments permettant d'introduire et d'orienter les observations de détails qui suivront.

Par contre lors d'un recensement systématique des zones instables d'une vaste région, cette phase devient primordiale et devra être conduite avec le maximum de précisions susceptibles de fournir des éléments de comparaison entre les différents glissements ; elle devra être étoffée obligatoirement d'une étude précise des photos aériennes.

II° - DESCRIPTION GENERALE DU SITE.

Au cours de cette deuxième phase, nous limitons le champ d'investigation afin d'accroître la précision et la rentabilité des observations. Le travail se fait donc au moins au 1/20 000.

Cette phase est très importante car elle permet :

- de placer le glissement dans son contexte immédiat ;
- de connaître la disposition et la nature des matériaux avant glissement ou reprise de mouvement et donc de fournir les paramètres à faire entrer en ligne de compte dans les calculs de stabilité ;
- de faire des hypothèses valables sur les causes possibles de la rupture.

Elle comprendra les six rubriques énumérées dans les pages précédentes.

II°, A - LOCALISATION ET LIMITES DE L'ETUDE.

Il est essentiel de déborder largement du cadre représenté par le glissement lui-même. Suivant les cas, plusieurs solutions peuvent se présenter.

On peut se fixer comme limites :

- soit le bassin versant topographique dominant ;
- soit l'unité géologique ou morphologique dominante, plateau, terrasse etc.,.
- soit encore une section transversale de la vallée avec étude comparative des versants opposés.

II°, B - GEOMETRIE ACTUELLE DU SITE.

Nous entendons par ce terme tout ce qui a trait :

- aux formes de surface (géométrie externe = géomorphologie) ;
- aux dispositions des terrains à l'intérieur du versant (ici géométrie interne = lithologie, stratigraphie) ;
- aux discontinuités affectant ces dispositions (ici géométrie interne = tectonique descriptive, analyse structurale) ;
- à l'arrangement et aux assemblages des grains du matériau (ici géométrie interne = minéralogie, sédimentologie) ;
- à la répartition des écoulements d'eau superficiels et souterrains (géométrie des circulations d'eau = hydrogéologie).

II°, B - 1 - Géométrie externe actuelle (géomorphologie numérique)

Les géomorphologues, dans leurs études sur l'évolution des versants, ont mis au point un certain nombre de techniques morphométriques ayant pour but, entre autre, de quantifier et de représenter d'une façon simple l'état d'un versant à un instant donné et partant, de déduire si possible l'histoire du façonnement. Ces techniques graphiques peuvent être judicieusement adaptées aux problèmes des glissements de terrain notamment dans le cadre d'une statistique à grande échelle, et mériteraient plus que l'énumération pure et simple que nous allons faire (1).

II°, B - 1 - 1 - Données topographiques.

a) Les premiers éléments topographiques intéressants consistent en des données altimétriques : altitude maxima, minima, moyenne, dominante que l'on peut comparer par la suite aux observations faites sur le glissement. La répartition des volumes topographiques ressortant assez mal à la seule observation qualitative, on adoptera des représentations graphiques simples, telles que les courbes de fréquence altimétriques et les courbes hypsométriques. Elles sont obtenues en portant en abscisse les surfaces en km² (courbe de fréquence alt.) ou en pourcentage (courbe hypsométrique) et en ordonnée les altitudes (courbe de niveau) figurées sur la carte topographique.

De ces courbes, on tire les résultats suivants :

- altitude moyenne = ordonnée moyenne de la courbe hypsométrique ;
- altitude la plus fréquente = maximum de la courbe de fréquence ;
- altitude de fréquence 1/2 = altitude correspondant au point d'abscisse 1/2 (50 %) de la courbe de fréquence altimétrique.

L'allure générale de ces courbes peut être exploitée à des fins statistiques.

b) La courbe hypsométrique présente une lacune assez grave car elle est indépendante de la valeur des pentes réelles, exception faite des versants à surface réglée somme toute assez rares. Des mesures clinométriques s'imposent donc et ce d'autant plus que la pente peut être une des causes d'instabilité. Elles figurent soit la répartition moyenne des pentes en fonction de l'altitude, soit la répartition générale en pourcentage des pentes d'un versant.

Les mesures de pente peuvent s'effectuer de deux façons (2)

- soit sur le terrain, tous les 5 ou 10 m à l'aide d'un niveau ;
- soit sur carte photogrammétrique.

On retient en général les valeurs de pente moyenne, de pente maxima et minima, la répartition des replats que l'on classe ensuite sous forme de tableau et de courbes statistiques.

c) De ces premiers résultats ainsi que de l'observation qualitative, il est intéressant de noter la forme générale du versant : convexe, concave, convexo-concave, rectiligne et les formes élémentaires telles les convexités sommitales, les concavités basales et les replats, toutes formes pouvant renseigner sur l'évolution et le façonnement. Ces notions prennent toute leur signification lors d'études de mouvement lents.

Les replats retiendront l'attention et leur origine devra être précisée : replats structuraux, épaulements glaciaires, terrasses, replats de glissement.

d) Enfin l'exposition du versant complétera les investigations topographiques générales.

II°, B - 1 - 2 - Données géomorphologiques.

Elles comprennent essentiellement des observations sur les grandes formes représentatives de la région tant au point de vue de leur nature : terrasse, falaise, cuesta, talwegs, plateau, que de leur répartition et dimensions.

(1) - Des commissions internationales spécialisées dans l'étude et l'évolution des versants ont été mises en place depuis ces 5 à 10 dernières années et publient des résultats intéressants lors de Congrès internationaux ou dans des périodiques tels que les "Annales de Géomorphologie".

(2) - La précision des mesures déterminées expérimentalement par P. MACAR et FOURNEAU pour des études clinométriques en Belgique était de :

- 0,5 à 1 % pour les pentes inférieures à 20 %
- 1,0 à 2 % " " allant de 20 à 40 %
- 2,0 à 4 % " " supérieures à 40 %.

II°, B - 2 - Géométrie interne actuelle.

Après avoir décrit la surface topographique du versant, il est nécessaire de connaître sa constitution interne. Ce stade d'étude suppose dès lors des investigations plus poussées d'où la nécessité d'un recensement et une mise à jour des observations de surface et d'un inventaire des données profondes existantes : galeries, tunnels, puits, tranchées, carrières, sondages susceptibles d'être complétés par la suite grâce à de nouvelles reconnaissances.

II°, B - 2 - 1 - Lithologie, stratigraphie.

Dans le cadre d'une étude de glissement, on retiendra surtout l'aspect lithologique conduisant en premier lieu à la distinction classique substratum - terrains de couverture, à la détermination de leur importance réciproque et de leur relation. L'accent sera mis sur 7 critères principaux.

a) Solidité : calcaires, grès par rapport aux marnes ou argiles - gneiss par rapport aux micaschistes - coulées par rapport au cendres volcaniques - argile, sable par rapport aux graviers, conglomérats etc...

A l'intérieur d'une même formation, il sera fait mention des zones éventuelles de faiblesse ou au contraire de celles plus résistantes.

b) Mode de dépôt :

- matériaux stratifiés ;
- matériaux non stratifiés en grandes masses ;
- matériaux en lentilles, en poches.

c) Épaisseur des différents volumes et strates : l'épaisseur des dépôts peut conditionner l'existence ou non de surfaces de faiblesse ou de zones solides, il sera utile de faire appel aux méthodes de la stratonomie et de l'analyse séquentielle, aussi bien à l'intérieur d'une même formation que pour un ensemble de terrains de nature différente.

Ce problème prend toute son importance dès que l'on a affaire à des terrains de couverture reposant sur un substratum et représentant le volume dangereux susceptible de glisser qu'il faudra cuber. A l'intérieur des formations de couverture, on portera la même attention aux alternances sables, graviers, argile soit à l'échelle de la lentille, de la couche, soit à l'échelle de la varve.

d) Les surfaces de contact, outre les fissures, dont nous reparlerons par la suite, ce sont essentiellement les plans de stratification, les limites terrain de couverture - substratum, les limites entre matériaux altérés ou glissés et les matériaux sains et en place. Les observations intéressantes porteront sur :

- l'épaisseur des joints ;
- la nature lithologique des joints ;
- l'allure des joints : lisse, rugueuse, ondulée, facilitant ou non le glissement (voir fig. 63a à 63 g) ;
- la pente par rapport à la pente générale des couches, le tout raccordé à la pente de la surface topographique.

L. BROILI a effectué de telles études sur le site du glissement de Vajont, où la forme, l'épaisseur des interlits argileux ou marneux, le nombre (en l'occurrence assez faible) ont joué un rôle non négligeable dans la rupture (cf. tableau ci-joint).

Formation	Membre	Distribution des interlits	
B		film millimétrique rare de marnes et calcaires marneux.	
C	1	film millimétrique de marnes et calcaires marneux très rare.	
	2	" " " " "	
	inclu dans le glissement	3	Présence de film millimétrique de marnes.
	4	Absence d'interlits - joints vides.	
	5	" "	
	6	Film millimétrique de marnes et calcaires marneux.	
	non inclu dans le glissement	7	Absence d'interlits - joints vides.
	8	Film millimétrique de marnes.	

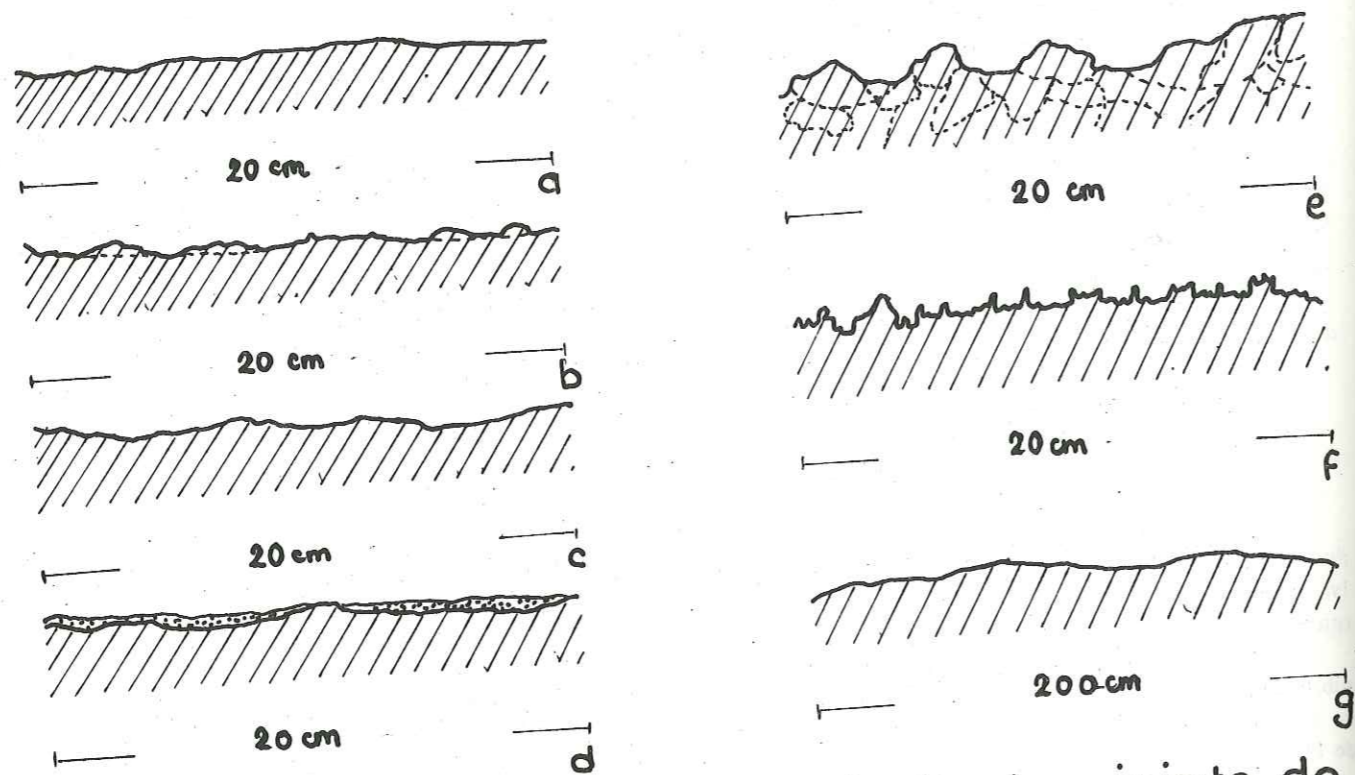


Fig. 63 a-g. Formes de détail des joints de stratification.

- 63 a : surface de joint ou de fracture : lisse
- 63 b : surface de joint ou de fracture : rugueuse
- 63 c : surface rugueuse à peu ondulée
- 63 d : surface rugueuse à peu ondulée (les dépressions étant remplies)
- 63 e : surface noueuse
- 63 f : surface rugueuse, surface en tenon due aux stylolites
- 63 g : surface ondulée (forme d'ensemble).

e) La pente. La pente des couches par rapport à celle du versant, étant un facteur déterminant dans de nombreux cas, doit être mesurée le plus souvent possible soit en surface à l'affleurement, soit en corrélant les données de sondages mécaniques et géophysiques, de façon à délimiter :

- les secteurs à pente conforme et inverse ;
- les secteurs à pente forte ou faible avec leur susceptibilité au fauchage.

f) La continuité, si l'on veut cerner le problème des causes lointaines de la rupture, on ne peut se contenter d'attribuer seulement des valeurs moyennes aux différents paramètres définissant une couche donnée. Il importe alors de vérifier la continuité et de faire figurer, sur documents cartographiques, son évolution dans l'espace.

g) Le pourcentage de terrain argileux, cette valeur est extrêmement importante et peut être estimée dans un premier temps (1). L'examen portera sur la différenciation du :

- pourcentage de terrain argileux, tourbeux par rapport au pourcentage de graviers, sables, galets ;
- pourcentage de terrain argileux, marneux par rapport aux autres formations lithologiques appartenant au substratum ;
- pourcentage de zones altérées.

h) Enfin il sera utile de raccorder ces premières investigations lithologiques à la stratigraphie générale ou régionale, transcrites et précisées sur carte au 1/20 000 ou 1/10 000.

II°, B - 2 - 2 - Géométrie de la fracturation.

Ceci fait appel à la tectonique descriptive et à l'analyse structurale. Les recherches s'étendront depuis les accidents majeurs ou mégafractures (faille - chevauchement) jusqu'à la microfissuration visible en lame mince en passant par l'étude des diaclases, de la schistosité, de la foliation, des plans de stratification et de leurs joints transversaux.

Les éléments intéressants seront :

- l'orientation moyenne des fractures ;
- la surface moyenne occupée par le réseau de fractures ;
- l'écartement moyen séparant deux discontinuités du même type et partant la maille du réseau ;
- l'épaisseur des discontinuités ;
- la matière éventuelle s'y trouvant.

La fracturation peut être vue sous plusieurs angles :

- diminution de la cohésion d'ensemble d'un massif rocheux ;
- zone de faiblesse ;
- mise en relation de volumes de nature et de propriétés différentes ;
- drain enterré amenant des quantités d'eau supplémentaires ;
- limites d'un glissement donné.

L'étude de la lithologie et de la fracturation permet alors de définir les grandes formes structurales homogènes du versant et leurs contours.

II°, B - 2 - 3 - Géométrie des grains du matériau.

Un échantillonnage, fait en surface et en profondeur dans chacun des volumes, constituant le versant, sera effectué en vue d'étudier la constitution interne du matériau dans trois directions principales.

a) La forme : matériaux en plaquettes - en grains - en lamelles - en aiguilles. Elle peut être à l'origine de surface de faiblesse.

b) La statistique des dimensions. Elle consiste en l'étude granulométrique des sédiments.

Au stade même du chantier, on s'efforcera déjà d'estimer le pourcentage des différentes fractions, le diamètre

(1) - Un observateur entraîné estimera par pétrissage la consistance d'un sol.

moyen et maximum des grains.

Dans un stade ultérieur, on utilisera les méthodes classiques de tamisage. Les résultats sont transcrits sur des diagrammes semi-logarithmiques sous la forme de courbe granulométrique.

Les caractéristiques granulométriques retenues sont :

- la détermination des indices granulométriques utile à l'identification précise du matériau, à partir de la courbe granulométrique elle-même.

- + les indices de classement : mettant en évidence le bon ou mauvais triage des sédiments (coefficient de courbure - d'uniformité - indice d'hétérométrie etc...)
- + le pourcentage de grains à diamètre inférieur ou égal à 2 microns, c'est-à-dire le pourcentage pondéral de particules argileuses rentrant dans le calcul de l'activité d'un sol argileux selon la définition de SKEMPTON (1953).
- + le décile I ou D₁ ou D₁₀ c'est-à-dire le diamètre des particules à 10 % de tamisat, appelé encore diamètre efficace, permet avec l'aide de l'indice de vide "e" de déterminer, d'une façon empirique, la perméabilité d'un sol, selon un certain nombre de formules comme celles de HAZEN, TERZAGHI, ZUNKER, IRMAY, KOZENY.
- + enfin des géomorphologues caractérisent les manteaux de débris évoluant en solifluxion et reptation par son spectre granulométrique jouant un rôle dans la capacité de rétention et dans le coefficient de frottement interne, rôle complexe qu'on ne sait pas encore définir très nettement. Le spectre granulométrique s'établit à partir de trois données principales.

- .. le mode ou grain le plus fréquent ;
- .. le pourcentage d'éléments inférieurs à 100 microns ;
- .. l'indice de classement d'ordre 4, c'est-à-dire le pourcentage d'échantillon compris entre les grains deux fois plus petits et deux fois plus grands que la médiane indiquant ainsi la plus ou moins grande dispersion du matériau.

La capacité de rétention augmente en général avec une élévation du % de particules inférieure à 100 microns (voir tableau n° 28) et la vitesse de filtration diminue d'où une variation de la teneur en eau facteur jouant un rôle essentiel dans les mouvements lents.

- le pourcentage gravier, sable et fines nous amènent à parler des classes et seuils granulométriques utilisés en France et à l'étranger.

En France on utilise couramment les classes définies par ATTERBERG (1905).

Cailloux - blocs	d supérieur à 20 mm
Graviers	d entre 20 mm et 2 mm
Gros sable (sable s. t.)	d entre 2 mm et 0,2 mm
Sable fin (sablon)	d entre 0,2 mm et 0,02 mm
Limon (poudre)	d entre 0,02 mm et 0,002 mm
Argile (micrite)	d inférieur à 0,002 mm (2 microns).

Ces seuils diffèrent plus ou moins d'un pays à l'autre ou d'un organisme à un autre. Les seuils de la classification U.S.C.S. (1) sont les suivants :

Cailloux	d supérieur à 76,2 mm
Gravier	d supérieur à 4,76 mm
Sable	d entre 4,76 mm et 0,074 mm
Fines	d inférieur à 0,074.

Le tableau n° 29 résume les différentes classifications. Le seuil 2 mm, employé par de nombreux organismes, semble le plus facile à utiliser ; néanmoins les seuils U.S.C.S. ont le mérite de distinguer dans la classe sable, les fractions grosses, moyennes, fines, données qualitatives relativement faciles à apprécier sur le chantier avec un peu d'habitude.

La dimension U.S.C.S. d = 0,074 mm marquant la limite sable - fines sera remplacée par le diamètre du tamis français le plus voisin 0,08 mm. Cette limite est d'ailleurs assez floue et varie suivant les pays de 0,002 mm à 0,006 mm. Le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées reprenant la classification U.S.C.S. adopte pour le classement des

(1) - U.S.C.S. = Unified Soil Classification System.

TABEAU N° 28 - CARACTÉRISTIQUES GRANULOMÉTRIQUES DES VERSANTS ET DES MATÉRIAUX FORMANT LE MANTEAU.

TYPE DE ROCHES DANS LEQUEL LE VERSANT EST TAILLÉ.	LOCALISATION	MODE DES PENTES MAXIMA MOYENNES	MODE DU SPECTRE GRANULOMÉTRIQUE	% < 100 μ	CAPACITÉ DE RÉTENTION MOYENNE	INDICE DE CLASSEMENT D'ORDRE 4
Calcaire crayeux Bathonien	environs de Saint-Laurent s/othain	18°	250 (1)	12,5 %	17 %	0,49
Calcaire corallien à plaquette des Hauts de Meuse	environs de Saint-Michel	25°	6 mm (1)	11 %	12 %	0,62
Grès calcaire Sinémurien	environs de Limes	27°	200 (1)	9,5 %	11 %	0,70
Calcaire oolithique des Hauts de Meuse	environs de Dieue	11°	1,1 mm (1)	7 %	15 %	0,75
Calcaire corallien des Hauts de Meuse	environs de Génicourt Lacroix	29°-30°	1,3 cm (1)	7 %	8 %	0,56

(1) - Ces résultats ont été obtenus en excluant les plaquettes - in R. SOUCHEZ - Revue Belge de Géographie - 1963 - 1 - p. 71.

TABLEAU N° 30 -

CLASSIFICATION DES SOLS GRENUS (plus de 50 % des éléments > 0,08 mm)					
Définitions		Symboles	Conditions	Appellations	
GRAVES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre de > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Gb (GW)	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Gm (GP)	Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	GL (GM)	Limite d'Atterberg au-dessous de A	grave limoneuse
			GA (GC)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	Sb (SW)	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Sm (SP)	Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	SL (SM)	Limite d'Atterberg au-dessous de A	sable limoneux
			SA (SC)	Limite d'Atterberg au-dessus de A	sable argileux

Lorsque 5 % < % inférieur à 0,08 mm < 12 % → on utilise un double symbole.
in Bull. liaison P. et Ch. n° 16 - 1965.

TABLEAU N° 31 -

CLASSIFICATION RAPIDE DES SOLS GRENUS					
PROCEDURE D'IDENTIFICATION SUR CHANTIER éléments > 60 mm exclus ; poids des fractions estimés				SYMBOLES (U.S.C.S.)	DESIGNATION géotechnique
1	2	3	4	5	6
Plus de la moitié des éléments sont > 0,08 mm SOLS GRENUS	Plus de la moitié des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm GRAVES	sans fines	Tous les diamètres de grains sont représentés, aucun ne prédomine	Gb (GW)	Grave propre bien graduée
		sans fines	Une dimension de grains ou un ensemble de dimensions de grains prédominant	Gm (GP)	Grave propre mal graduée
	avec fines	avec fines	Les éléments fins n'ont pas de cohésion	GL (GM)	Grave limoneuse
		avec fines	Les éléments fins sont cohérents	GA (GC)	Grave argileuse
Plus de la moitié des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm SABLES	sans fines	sans fines	Tous les diamètres de grains sont représentés, aucun ne prédomine	Sb (SW)	Sable propre bien gradué
		sans fines	Une dimension de grains ou un ensemble de dimensions de grains prédominant	Sm (SP)	Sable propre mal gradué
	avec fines	avec fines	Les éléments fins n'ont pas de cohésion	SL (SM)	Sable limoneux
		avec fines	Les éléments fins sont cohérents	SA (SC)	Sable argileux

in Bull. liaison P. et Ch. n° 16 - 1965.

où V_v = volume total des vides.
 V = volume total de la roche.

- la porosité "n" en % (1) $n = \frac{V_v}{V} \times 100$
- la teneur en eau en %
- la densité.

II°, B - 3 - Géométrie des circulations d'eau - hydrogéologie descriptive.

L'eau constituant dans de nombreux cas une des causes majeures de glissement, il est essentiel d'en étudier la répartition et le comportement à l'intérieur d'un versant ou d'un talus. Dans ce paragraphe, nous aborderons le problème sous l'angle disposition du volume liquide par rapport au volume solide dont on aura défini précédemment les paramètres.

II°, B - 3 - 1 - Le ruissellement de surface.

L'écoulement des eaux courantes prend deux formes principales.

+ Le ruissellement diffus des eaux sauvages ; l'eau tombée sous forme de pluie, sur un versant ne s'écoule pas en totalité, une partie s'évapore et une autre s'infiltré. Il est bon alors de connaître d'une façon approximative le coefficient d'écoulement sur une pente et un terrain de perméabilité donnés. Ceci revient à savoir si le ruissellement est inférieur ou supérieur à l'infiltration, et ainsi à déterminer les différents secteurs soumis à l'une ou l'autre de ces actions. Mais les bassins versants ne présentent pas de surfaces géométriques parfaitement planes, et d'autre part les agents atmosphériques agissent de façon très variable, le ruissellement de surface peut prendre alors une allure dirigée et localisée, favorisant la création de rigoles temporaires, nombreuses et peu profondes responsables des "descentes de sols" bien connues des paysans.

Le ruissellement hiérarchisé en un réseau hydrographique propre drainant le bassin versant est caractérisable par :

- le degré de hiérarchisation du réseau et sa forme ;
- la pente des cours d'eau ;
- les directions d'écoulement ;
- la surface drainée ;
- les débits moyens et débits spécifiques ;
- le pourcentage d'infiltration, la localisation de pertes éventuelles ;
- la position du collecteur principal ;
- l'activité des torrents que l'on peut traduire par l'intensité d'érosion régressive, d'affouillement des berges donnée, appréhendable par l'observation des formes des talus et les mesures de débits solides.

II°, B - 3 - 2 - Les sources et zones de suintement

Leur étude est très importante, il s'agit de faire un recensement des émergences captées ou non. On notera surtout :

- leur caractère diffus ou localisé ;
- le type de source :
 - + zone de suintement
 - + source de fissure
 - + source de contact entre terrain de nature différente
 - + source de glissement (2)

(1) - La relation entre l'indice de vide "e" et la porosité en % "n" se traduit par les équations :

$$e = \frac{n}{1 - n} ; n = \frac{e}{1 + e}$$

(2) - Source ou suintement occasionné et induit par les fissures, crevasses, bourrelets et mouvements d'ensemble.

- la localisation : sources groupées ou non ;
- le débit moyen ;
- la direction d'écoulement.

II°, B - 3 - 3 - Zones d'infiltration et de stagnation, plans d'eau libre naturels.

Sous ce titre nous groupons les marécages, les tourbières, les lacs et étangs naturels temporaires ou permanents, qui se sont installés dans le versant à la faveur de replats et sont susceptibles de fournir des apports d'eau supplémentaires. Nous y ajoutons aussi les zones d'infiltration induites par les karsts, les entonnoirs de dissolution, les entonnoirs d'ablation et les "folletières".

On les localisera sur carte en délimitant leurs contours, leur répartition en fonction des formes topographiques et de la nature des terrains. On en déduit ainsi le pourcentage de zones humides par rapport à la superficie totale du versant étudié.

II°, B - 3 - 4 - Les nappes.

Les études seront orientées vers la détermination :

- du type de nappe : nappe à surface libre, nappe captive, écoulement diffus à la surface d'un niveau imperméable ;
- la position de la nappe : en plan et sur la verticale ;
- l'épaisseur moyenne de cette nappe et la nature du terrain magasin ou réservoir ;
- le gradient de la nappe.

II°, B - 3 - 5 - Les circulations et plans d'eau libres artificiels.

Par ses travaux, l'homme modifie souvent considérablement l'écoulement naturel. Il convient donc de prendre en considération ces travaux de façon à en faire l'étude critique lors de la recherche des causes de glissement.

Le problème peut être vu sous deux angles :

- les travaux servant à stocker et à distribuer l'eau (intacte ou usée). Pour le stockage, nous nous intéresserons surtout aux lacs de barrage de quelque importance qu'ils soient. Outre les influences sur les écoulements souterrains des versants, l'attention sera attirée sur :
 - . le pourcentage de submersion, c'est-à-dire la hauteur maximum ou moyenne, selon les cas, du versant immergé à un instant donné ;
 - . le poids supplémentaire imposé au versant du fait du volume d'eau stocké ;
 - . les fuites éventuelles de la retenue.

Pour les ouvrages destinés au transport de l'eau à l'air libre ou en souterrain : canaux d'irrigation, égout, conduite forcée ou libre, dont l'étanchéité ne saurait être considérée comme absolue, les investigations porteront sur la détection de fuites éventuelles, ou sur les secteurs d'utilisation maximum des réseaux d'irrigation par ruissellement, par exemple.

- les travaux jouant le rôle de drain comme les rigoles de drainage établies par les paysans, les galeries de mines, les tunnels, les fossés de routes.

L'étude de la géométrie des circulations d'eau conduit tout naturellement à l'établissement d'une première ébauche de carte hydrogéologique représentant les variations, la localisation, l'importance des écoulements d'eau superficiels ou souterrains, à un instant donné, en fonction de la morphologie, de la topographie et de la géologie. C'est pour cette raison qu'il est préférable de prendre comme cadre d'étude d'un glissement le bassin versant topographique dominant.

II°, C - NATURE PETROGRAPHIQUE ET PHYSICO-CHIMIQUE DES MATERIAUX.

Après avoir replacé les différents volumes dans l'espace, on abordera l'identification des matériaux. Ce travail fait appel aux méthodes classiques de la pétrographie, de la minéralogie et de la chimie, mais elles doivent être orientées vers l'appréciation de la stabilité d'un versant et l'établissement des lois rhéologiques. Pour ce faire, nous

avons subdivisé l'étude des matériaux en quatre stades différents, la nature mécanique faisant l'objet d'investigations particulières que nous traiterons dans un paragraphe suivant.

- nature pétrographique ;
- nature chimique ;
- nature électrique ;
- nature thermique.

Ces données commandées, pour la plupart d'entre elles, par la géométrie des grains, sont liées les unes aux autres, nous les avons dissociées par souci de clarté car elles exigent des modes opératoires différents, faisant appel à des disciplines spécialisées dépassant le cadre de la géologie pure.

II°, C - 1 - Nature pétrographique et chimique.

La détermination systématique de la nature des matériaux permet d'établir des corrélations avec leurs propriétés physiques et mécaniques et de prévoir les variations, compte tenu des travaux effectués par l'homme, et de l'évolution normale par altération. Les techniques du microscope, des calculs pétrographiques et des rayons X aboutiront à la détermination :

- des principaux constituants minéralogiques de la roche : grains et matrices ;
- des pourcentages approchés de ces constituants.

Ces recherches deviennent primordiales pour tous les nombreux matériaux naturels comportant une phase argileuse, facteur d'instabilité. Celle-ci intervient, nous l'avons vu, par son abondance et par la nature minéralogique de ses constituants. Son étude est trop souvent négligée sans doute à cause de la longueur des essais, du matériel coûteux, pour une précision et une rentabilité parfois aléatoire. Précisons cependant que depuis quelques années, les ingénieurs ayant à construire sur des terrains où la phase argileuse est prépondérante, ont remis en honneur l'étude fondamentale des argiles aussi bien sous l'angle pétrographique et minéralogique que mécanique. Les Scandinaves et les Canadiens, préoccupés par le déclenchement de mouvements souvent imprévisibles dans les argiles sensibles, poussent l'analyse des argiles à un degré extrême jusque dans les méthodes et la fréquence d'échantillonnage, et leur précision ne semble pas superflue en regard des résultats obtenus.

Les principales investigations sont les suivantes.

II°, C - 1 - 1 - La détermination qualitative aux rayons X des principaux minéraux décelables sur une poudre : quartz, feldspath, clacite, dolomite, gypse, et parfois quelques minéraux argileux.

II°, C - 1 - 2 - La dissociation des fractions solubles (carbonates - matières organiques) et insolubles (quartz, feldspath, argile, micas), en milieu acide. Les carbonates sont détruits par l'acide chlorhydrique et les matières organiques par l'eau oxygénée ; les liants de particules argileuses sont donc éliminés ainsi que les sulfates, les hydroxydes de fer, les oxydes de fer et partiellement les chlorites.

Par pesée on détermine alors le pourcentage des deux fractions.

II°, C - 1 - 3 - L'évaluation du pourcentage global des argiles ; les résultats de l'analyse thermodynamique ne sont quantitatifs que pour les mélanges simples (1) ce qui est rarement le cas des sédiments naturels. Il existe d'autres moyens classiques pour déterminer ce pourcentage et en particulier l'analyse sédimentométrique des sédiments argileux portant sur le pourcentage de particules inférieures à 2 microns (certains auteurs admettent comme seuil des particules argileuses 5 à 6 microns), vérifiées aux rayons X sur lame orientée (les sédiments glaciaires ou ceux ayant subi une forte altération peuvent contenir autre chose que des argiles). Cette détermination entre en ligne de compte dans le calcul de l'activité d'un sol et peut donc caractériser sa nocivité.

II°, C - 1 - 4 - La détermination qualitative et quantitative des minéraux argileux par analyse thermodynamique et chimique. Cette recherche est essentielle dans le cas de sédiments très argileux, argile lacustre, glaciaire ou post-glaciaire, marine, dont les propriétés sont très différentes selon la nature des minéraux argileux et leurs cations échangeables.

(1) - On procède par planimétrage des pics.

II°, C - 1 - 5 - La détermination du pourcentage de matières organiques qui modifient, elles aussi, les propriétés mécaniques notamment la résistance au cisaillement en présence d'humidité.

II°, C - 1 - 6 - Les analyses chimiques des eaux imbibant les sols aussi bien souterraines que superficielles. Des eaux séléniteuses et à degré hydrotimétrique élevé sont susceptibles de modifier la cohésion des argiles, par phénomène de défloculation ; il importe alors de faire des analyses chaque fois que la présence de terrains gypseux aura été détectée et de contrôler les propriétés mécaniques des matériaux soumis à l'action de telles eaux.

II°, C - 1 - 7 - Conclusions : méthode générale d'étude de la nature chimique et pétrographique des matériaux. L'échantillonnage doit rendre compte d'une manière la plus représentative possible des hétérogénéités des terrains ; les prélèvements se feront donc à la fois en surface et en profondeur selon les moyens dont on dispose. Ils seront d'autant plus fréquents que l'on aura affaire à des matériaux tendres, meubles, argileux, facilement altérables, très hétérogènes.

Les échantillons seront divisés en trois parties :

- une partie sera réservée à l'examen pétrographique classique ;
- une partie sera broyée finement et destinée à l'analyse chimique, thermodynamique, à la calcimétrie, au contrôle par diffractométrie classique ;
- une partie enfin, indemne de tout broyage et remaniement violent, sera mise à sédimenter afin de recueillir la fraction inférieure à 2 microns, soit par méthode de la pipette pour contrôle sur lame orientée, soit au densimètre ou à la balance à sédimentation sans possibilité de contrôle.

II°, C - 2 - Nature électrique.

Dans un sol, la conductibilité électrique de la phase solide est habituellement faible, le passage du courant dans un matériau rocheux est assuré par le mouvement des ions dans l'eau remplissant les vides du matériau. En conséquence, la conductibilité électrique d'un sol dépend de sa teneur en liquide et de la conductibilité de ce liquide, donc de la porosité effective que l'on définit comme le volume relatif des vides pouvant être occupés par le fluide conducteur. On avancera que généralement la résistivité d'une roche ou d'un sol est inversement proportionnelle à sa porosité et à la concentration ionique du fluide d'imbibition.

On a pu établir des relations empiriques entre la résistivité d'une formation, la résistivité du liquide d'imbibition, la porosité et la texture de la roche permettant de déterminer ce que les pétroliers appellent le "facteur de formation" défini comme "le rapport (constant) de la résistivité de la roche à celle de l'eau d'imbibition".

$$\text{soit } F = \frac{t}{w}$$

Ce rapport peut varier considérablement dès qu'il y a une quantité notable d'argile ; le professeur BERTHIER a montré que la limite de plasticité d'un mélange d'eau et d'argile correspond à un changement dans son comportement électrique.

Cette analyse s'effectue par carottage électrique directement à partir d'un sondage et par contrôle au laboratoire. Les diagraphies électriques employées de plus en plus dans le domaine du génie civil par les Italiens, fournissent par la même occasion des renseignements complémentaires très précieux sur la géométrie, les zones de circulations et les zones argileuses.

La prospection électrique de surface reste encore à ce jour assez limitée dans la recherche de la susceptibilité au glissement. Des essais effectués en Suisse, dans le cadre de la reconstruction d'un village sur des terrains présumés instables à l'observation de surface, n'ont pu aboutir à la délimitation des zones favorables ou défavorables et ce, malgré un étalonnage très sérieux.

II°, C - 3 - Nature thermique.

Les cycles de température soumettant les matériaux à des contraintes plus ou moins fortes et d'intensité variable dont l'influence se répercutera sur certaines propriétés mécaniques. La connaissance de ces cycles et de leur action permet d'appréhender les phénomènes d'altération, de fissuration superficielle, de solifluxion et de reptation.

Nous nous intéresserons aux deux cycles simples principaux :

- cycle du froid : gel - dégel ;
- cycle de la chaleur : humidification - dessiccation.

II°, C - 3 - 1 - Cycle gel - dégel.

Outre les aspects bien connus de libération brutale d'une grande quantité d'eau lors du dégel, et ceux d'augmentation de la teneur en eau, nous porterons notre attention sur deux actions du gel intervenant dans les mouvements lents :

- gonflement dû au gel ;
- gélivation.

a) Le gonflement dû au gel. Ce gonflement se manifeste par un soulèvement de la surface du sol faisant suite à la formation de couches ou de lentilles de glace à l'intérieur du terrain. L'intensité du processus dépend de nombreux facteurs,

+ La granulométrie et la texture du sol. G. BESKOW (1935) a conclu que le gonflement ne se manifestait pas en général pour des sols contenant moins de 30 % en poids de particules passant au tamis de 0,062 mm, ou moins de 55 % en poids de particules passant au tamis de 0,125 mm⁽¹⁾.

Pour K. TERZAGHI et R.B. PECK, les couches de glace ne se forment que dans des sables à grains fins. Le seuil de séparation entre les sols sujets à la formation de couches de glace et ceux qui ne le sont pas dépend de l'uniformité,

- dans les sols parfaitement uniformes, les couches de glace ne se forment que lorsque les grains ont moins de 0,01 mm ;
- pour les sols d'uniformité moyenne, il faut au moins 10 % de grains en-dessous de 0,02 mm ;
- dans les sols à granulométrie complexe, la formation de glace ne peut avoir lieu que si les grains inférieurs à 0,02 mm constituent au moins 3 % de l'agrégat total.

MIELENZ et KING (1955) ont aussi établi que la structure la plus favorable au gonflement par le gel se situait entre celle des sables fins ou des limons grossiers et celle des argiles consistantes, ces dernières interdisant pratiquement la formation de lentille de glace étant donné leur perméabilité très faible.

La figure 64 montre les seuils granulométriques de susceptibilité au gel pour des sols morainiques affectés de solifluxion intense dans les régions hautes de Norvège.

- + L'humidité du sol et les mouvements de l'eau vers la zone gelée ; grâce à un accroissement des volumes des vides, selon un processus similaire au mouvement de l'eau vers une surface d'évaporation.
- + La vitesse de formation du gel. Une diminution de la vitesse de congélation contribue à former des lentilles de glace plus importantes. Une augmentation de la vitesse réduit au contraire les dimensions de ces mêmes lentilles.
- + La surcharge. Toute augmentation de pression réduit la vitesse d'écoulement de l'eau à la surface des lentilles de glace (la pression considérée ici est celle normale à la surface de la lentille).
- + La teneur en argile et la nature des minéraux argileux.
 - Pour 5 % d'argile ajouté à un sable, un léger gonflement peut apparaître.
 - Pour des additions de 10 à 20 %, le gonflement se manifeste largement.
 - Si la quantité d'argile devient importante, 40 % par exemple, le gonflement décroît vers zéro (MIELENZ et KING).
 - LAMBE (1953)⁽²⁾ a montré que pour un mélange de sable et d'argile, avec de basses teneurs en argile, le gonflement dû au gel décroissait dans l'ordre suivant : illite - kaolinite - montmorillonite et pour de fortes concentrations : kaolinite - illite - montmorillonite. Enfin la chlorite semble avoir les mêmes propriétés gonflantes que la kaolinite et l'attapulgite peut aussi gonfler d'une façon importante.

(1) - G. BESKOW, "Tjåbildningen och tjållyftningen med särskild hänsyn till vägar och jernvägar" (résumé anglais), Sverig. Géol. Under. Ser. C, N° 375, 1935.

(2) - T.W. LAMBE, "Cold room studies, appendix D : mineral and chemical studies, in U.S. army Corps of engineers" "Frost investigations" 1953.

Les particules sup. à 2mm. ne sont en général pas susceptibles de gonflement sous l'effet du gel.

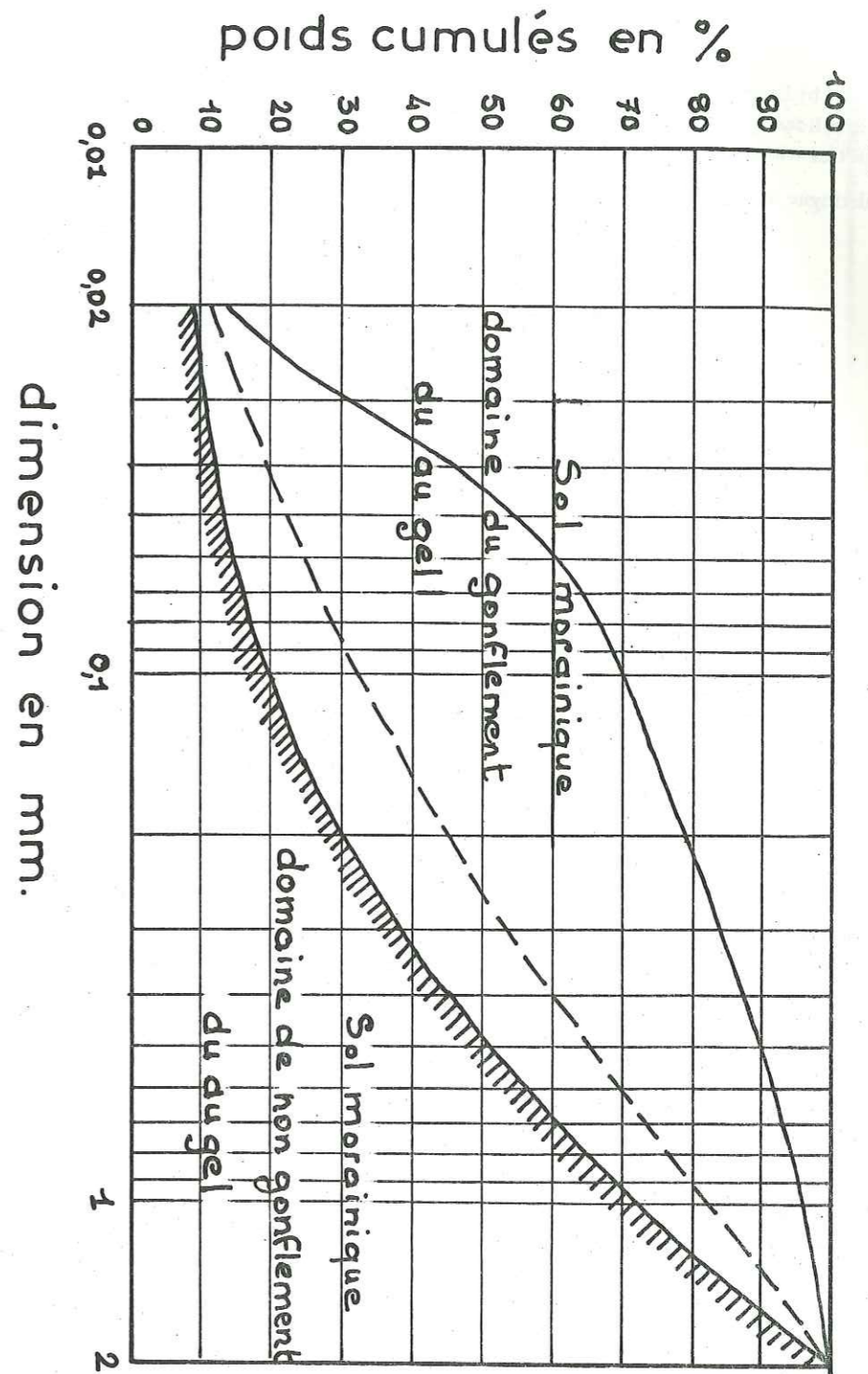


Fig 64. Seuils granulométriques de susceptibilité au gel,

sols morainiques (solifluxion en Norvège) (P. J. WILLIAMS)

+ On doit noter aussi que la présence de fissures permet des mouvements d'eau dans les sols et peut donc constituer le facteur prédominant du gonflement à l'exclusion des autres cités ci-dessus.

b) La gélivation. Le gel peut avoir une autre action importante aussi bien sur les roches meubles que sur les roches solides : la désagrégation par gélivation créant ainsi des étendues de produits fins pulvérulents, ou à l'état de plaquettes très sensibles aux mouvements lents de reptation et de solifluxion.

On distingue en général :

- + la macrogélivation aboutissant à la formation de galets et de blocs par action du gel, ceci dépendant de la largeur et de la densité (maille) des fissures ; elle est responsable des "coulées de blocailles" observées en Belgique.
- + la microgélivation ou désagrégation de la roche en éléments fins dépendant de la porosité et plus précisément de la microporosité c'est-à-dire le volume des pores de rayon inférieur à 1/10 de micron, exprimée en pourcentage du volume total.

Ces deux processus favorisent l'action de la corrosion chimique qui elle, contribue à affiner un peu plus les fragments de roche jusqu'à les transformer suivant un temps plus ou moins long, en argile influençant ainsi considérablement la stabilité d'un manteau de débris.

R. SOUCHEZ a observé dans les Ardennes, l'action du gel sur des calcaires et grès dans les pentes soumises à la solifluxion (tableau n° 32).

Toute étude des actions du gel, ayant trait à des problèmes de stabilité, doit susciter les questions suivantes :

- le sol est-il susceptible de se congeler, et à quel degré ?
- si oui, quel est le volume d'eau disponible durant le gel et la profondeur du niveau de la nappe ?
- quelle est la vitesse de congélation ?
- quelle est la profondeur de pénétration du gel ?
- quelles sont les zones susceptibles de soulèvement, et leurs dimensions ?
- quel est le pourcentage et la vitesse de gonflement ?
- quelle est l'intensité de la gélivation, épaisseur et volume de matériaux fins ainsi libérés ?

II°, C - 3 - 2 - Effets de la chaleur - séchage - dessiccation.

Les cycles de dessiccation et d'humidification successifs modifient les propriétés des roches et des sols. On sait depuis CASAGRANDE que le séchage peut modifier la plasticité d'un sol. Un des effets le plus connu est évidemment le retrait accompagné de fissures dans un sol argileux, cette fissuration permettant des infiltrations plus ou moins importantes, doit être étudiée de façon à en connaître l'extension en plan et en profondeur selon les saisons.

II°, C - 3 - 3 - Méthodes d'étude de la nature thermique.

Les études se font à la fois au laboratoire et sur le terrain.

a) Au laboratoire ; nous ne discuterons pas les nombreuses modalités techniques mises en œuvre pour faire subir à un échantillon donné des cycles gel - dégel ou dessiccation - humidification. Bien que les techniques dans ce domaine aient fait de gros progrès, les méthodes sont encore très empiriques.

Les effets de vieillissement sont obtenus en soumettant les échantillons à une série de cycles d'humidification, sans pression, pendant une semaine puis à un séchage à l'air pendant une semaine, B. SCHNEIDER taille des lames colorées et observe la longueur des microfissures par unité de surface de lame (cm²).

En Angleterre et au Canada, des études de mouvements saisonniers dans des sols argileux s'appuient sur des relations du type $\frac{dw}{dz}$ où

dw = le déficit en eau.

dz = mouvements verticaux.

Une des méthodes consiste à prélever des échantillons de 8 inches de diamètre et de 12 inches de longueur à différentes profondeurs et à soumettre la surface de chaque échantillon à des températures de 70° C. La perte de poids et la longueur sont mesurées à intervalle régulier pendant l'opération et on porte les résultats sur des graphiques donnant la réduction en poids et en longueur de l'échantillon sec.

TABLEAU N° 32 - COMPORTEMENT DE QUELQUES ROCHES VIS A VIS DU GEL ET DE LA CORROSION CHIMIQUE -

TYPE DE ROCHES	MICROPOROSITE	GELIVITE	CORROSION CHIMIQUE	TYPE DE MANTEAU
Grès calcaires Sinémurien	4 à 6 % fissures étroites assez nombreuses	Macrogélivation active libère des plaquettes	Active : libère les grains de sable en dissolvant les ciments.	Sable + plaquettes de grès
Calcaires compacts Bajocien	2 à 3 % peu de fissures	Macrogélivation relativement peu active.	Active donnant des quantités assez élevées de produits inférieurs à 10 microns, car calcaire assez impur.	Fragments rocheux englobés dans une pâte de matériaux inférieurs à 10 microns.
Calcaires crayeux Bathonien	5 à 7 % fissures étroites orthogonales, nombreuses.	Macrogélivation active : libère des plaquettes Microgélivation peu active : libère grèze sablo-limoneuse à % variable de grains inférieurs à 100 microns.	Active mais donne peu de produits fins car calcaires très purs.	Grèze sablo-limoneuse contenant une forte proportion de produits fins plus plaquettes.
Calcaires coralliens des Hauts de Meuse : Rauracien	6 à 9 % fissures macroscopiques et microscopiques.	Macrogélivation et Microgélivation actives : grèze graveleuse à % variable de produits fins et plaquettes.	Active mais donne peu de produits fins car calcaires assez purs.	Grèze graveleuse contenant un % variable de produits fins et de plaquettes.
Calcaires oolithiques des Hauts de Meuse : Rauracien	5 à 9 % fissures inférieures à 3 mm assez nombreuses.	Microgélivation active : grèze sablo-graveleuse.	Active mais donne peu de produits fins car calcaires assez purs.	Grèze sablo-graveleuse.

(D'après données de R. SOUCHEZ dans l'article "Evolution des versants et théorie de la plasticité" - Revue Belge de Géographie, 1963).

TABLEAU N° 33 - GELIVITE DES SOLS GRAVELEUX ET SABLEUX -

	SOLS GRENUS	
	DENOMINATION	GELIVITE
<u>GRAVES</u> et <u>SOLS GRAVELEUX</u>	Grave ou mélange gravier sable bien gradué avec peu ou pas de sable	aucune ou très faible
	Grave ou mélange gravier sable mal gradué avec peu ou pas de fines	aucune ou très faible
	Grave limoneuse mélange gravier sable limon.	faible à moyenne
	Grave argileuse, mélange gravier - sable - argile.	faible à moyenne
<u>SABLES</u> et <u>SOLS SABLEUX</u>	Sable ou sable graveleux bien gradué peu ou pas de fines	aucune ou très faible
	Sable ou sable graveleux mal gradué peu ou pas de fines	aucune ou très faible
	Sable limoneux, mélange sable - limon	faible à élevée
	Sable argileux, mélange sable - argile	faible à élevée

in "soil Manual", the Asphalt Institute ; traduction L.C.P.C.

TABLEAU N° 34 - GELIVITE DES SOLS FINS -

	SOLS FINS	
	DENOMINATION	GELIVITE
<u>LIMONS</u> et <u>ARGILES</u> à L.L. inf. à 50	- Limons non organiques et sables très fins. - Sables fins limoneux ou argileux - Limons argileux peu plastiques	moyenne à très élevée
	- Argiles non organiques de plasticité faible à moyenne. - Argiles graveleuses. - Argiles sableuses. - Argiles limoneuses. - Argiles maigres.	Moyenne à très élevée
	- Limons organiques. - Limons, argiles organiques de faible plasticité.	moyenne à très élevée
	- Limons non organiques. - Sols sableux, fins ou limoneux.	moyenne à très élevée
<u>LIMONS</u> et <u>ARGILES</u> à L.L. sup. à 50	- Argile non organique de plasticité élevée. - Argiles grasses.	moyenne
	- Argiles organiques de plasticité moyenne à élevée. - Limons organiques.	moyenne

	SOLS TRES ORGANIQUES	
	- Tourbes et autres sols très organiques.	faible

in "Soil Manual", The Asphalt Institute, traduction L.C.P.C.

Les résultats de laboratoire restent cependant assez subjectifs car l'influence thermique est liée à d'autres facteurs tels que le couvert végétal, les précipitations liquides ou solides.

b) Sur le terrain. Les observations in situ ont le mérite de fournir des résultats tenant compte de l'environnement, mais là encore, ils devront être pris en valeur relative et leurs interprétations ne seront formulées qu'avec précautions.

Un certain nombre de "jagues" composées de tubes télescopiques et de petite semelle à la base du tube servent à mesurer le soulèvement du sol (dZ), on les enfonce à force ou on les place dans des sondages ; le dW est calculé en mm d'eau à partir de deux essais de teneur en eau (1).

S.A. SCHUMM a observé pendant 4 ans l'importance de l'érosion soit par reptation et solifluxion soit par ruissellement en faisant des lectures périodiques (chaque trimestre) sur des jalons métalliques sans semelle inférieure, plantés à la même profondeur et reliés topographiquement à des points fixes. Il a ainsi constaté selon les périodes, le gonflement du sol et son ameublissement progressif (piquets pratiquement enterrés au printemps à la suite du gel hivernal) et le tassement à la suite des précipitations estivales et des grandes chaleurs (piquets ressortant le plus en automne). Cela lui a permis, en outre, de déterminer une reptation dans les 5 à 10 cm supérieurs du sol ; toutefois les résultats doivent être interprétés avec précaution car il semble difficile de faire la part exacte des mouvements formant des petits bourrelets et du soulèvement dû au gel à moins de contrôles très fréquents.

Ces observations doivent être couplées avec des mesures précises de température, non seulement de l'air (thermographe enregistreur) mais encore du sol à des profondeurs différentes, et avec des mesures de niveau d'eau et de pression interstitielle.

La mesure de température du sol se fait à l'heure actuelle à l'aide de thermistances noyées dans un tube plastique muni d'une pointe en acier permettant l'enfoncement à force dans un sol mou si besoin est. On obtient ainsi des mesures très précises que l'on doit enregistrer en fonction du temps. La densité des points de mesure est variable ; les Suédois implantent, pour une superficie de terrain en solifluxion de 2000 m², jusqu'à 10 à 20 thermistances à différentes profondeurs, accompagnées d'un thermographe enregistreur et de 5 à 10 piézomètres munis de capteurs de pression. Une telle densité se conçoit évidemment dans le cadre d'études fondamentales telles que J. WILLIAMS les menaient dans des terrains en solifluxion à l'aval de névés tardifs.

Les études de la nature thermique des matériaux font intervenir à ce stade la notion de temps et de fréquence de mesure, deux choses indispensables à la compréhension de l'évolution des mouvements.

II°, D - NATURE MECANIQUE DU MATERIAU.

L'étude des propriétés mécaniques du matériau, représentant un stade important dans la reconnaissance d'un site, nous lui avons réservée une place à part. Les techniques d'essai étant connues et largement commentées dans de nombreux ouvrages de mécanique des sols, nous ne les détaillerons pas.

Le mécanicien du sol ou des roches, selon les premières informations fournies par le géologue, oriente en général ses essais de deux façons différentes :

- l'identification ;
- l'étude de la résistance.

II°, D - 1 - L'identification.

Elle porte essentiellement sur :

- a) le poids spécifique du sol humide (densité humide) en g/cm³
 du sol sec (densité sèche) en g/cm³
 des grains solides en g/cm³.

- b) les teneurs en eau naturelle. W %,
 . soit sur le chantier à l'aide de picnomètre à air ou de bombe à carbure ;
 . soit au laboratoire par passage à l'étuve et pesée.

(1) - Des précisions sur ces appareillages sont fournies dans l'article de BARACOS A. et MARANTZ O. "Vertical ground movements" Proc. 6th. Canadian Soil Mechanics Conference, Winnipeg.

Ces mesures sont indispensables dans l'étude de coulées et de solifluxion ; elles doivent être pratiquées systématiquement sur les sols en place, non seulement pour chaque formation rencontrée, mais encore à différents niveaux d'une même formation. Des mesures saisonnières peuvent être envisagées en vue de corrélations avec les précipitations, la capacité de rétention d'un sol, les battements de la nappe.

c) les limites d'Atterberg. Il est commode d'exprimer les propriétés plastiques d'un sol par ses limites de plasticité (L.P. ou W.P.) et de liquidité (L.L. ou W.L.). Les premiers résultats permettent de classer le sol selon sa plasticité.

La connaissance des limites d'Atterberg permet en outre de définir d'autres paramètres comme :

+ l'indice de plasticité (Ip) ; il entre en ligne de compte dans le calcul de "l'activité d'un sol"

$A_c = \frac{I_p}{\% \text{ Argile}}$. L'activité d'un sol, nous l'avons vu, dépend de nombreux facteurs : géologie et minéralogie des argiles, pourcentage de matière organique, résistance au cisaillement. Nous avons consigné dans le tableau n° 35 quelques valeurs de l'activité de sols argileux ou non.

Cet indice permet en outre de rendre compte de la nocivité d'un sol, toutefois un sol inactif n'est pas forcément un bon sol.

+ l'indice de liquidité appelé encore indice de consistance (Ic) qui est défini par le rapport suivant :

$$I_c = \frac{\text{Teneur en eau } W \% - \text{Limite de plasticité } L.P.}{\text{Indice de plasticité } I_p}$$

l'indice de liquidité peut être utilisé comme une simple mesure de la sensibilité à partir d'un graphique reliant la sensibilité vraie à l'indice de liquidité

- . lorsque la teneur en eau naturelle d'un sol est supérieure à la limite de liquidité (Ic = inf. à 0), ce sol se transforme en boue épaisse dès qu'il est trituré.
- . si la teneur en eau est inférieure à la limite de plasticité (Ic sup. à 1) les sols ne sont pas malléables.

Les limites sont donc importantes à connaître car elles permettent d'expliquer le déclenchement des mouvements mettant en jeu des terrains argileux, notamment pour la solifluxion, et les coulées de tout genre. Une argile à limites basses doit être considérée comme dangereuse si les conditions de saturation et d'écoulement en son sein sont réunies.

d) la limite de retrait L.R. est la teneur en eau au-dessous de laquelle une perte supplémentaire d'eau par évaporation n'entraîne plus de réduction de volume, ce qui explique la formation de fissures dans les sols argileux dès que la teneur en eau est inférieure à cette limite.

e) l'indice de vide.

f) la perméabilité, mesurée soit sur le terrain par essai Lefranc - Lugeon ou par essai de pompage, soit au laboratoire.

Ces deux derniers facteurs conditionnent le franchissement des limites par la teneur en eau.

II°, D - 2 - Les essais de résistance.

Ils ont pour but d'étudier la relation contrainte - déformation et de dégager les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau. Ces essais sont effectués soit au laboratoire, sur des échantillons non remaniés, soit in situ.

II°, D - 2 - 1 - Essais de laboratoire.

Ils sont orientés vers la détermination des principaux paramètres suivants : cohésion - angle de frottement interne - résistance au cisaillement - résistance à la compression - résistance à la traction - pression interstitielle - contraintes intergranulaires. Les essais seront effectués avec les hypothèses les plus pessimistes, c'est-à-dire matériaux consolidés non drainés.

On effectue une série d'essais sur échantillon intact puis sur échantillon remanié sans modifier la teneur en

TABLEAU N° 35 - VALEURS D'ACTIVITE DE CERTAINS SOLS

MONTMORILLONITE	Ac = de 0,50 à 7,00
ATTALPUGITE	Ac = de 0,57 à 1,23
ILLITES	Ac = de 0,23 à 0,58
KAOLINITES	Ac = de 0,01 à 0,41
HALOYSITES	Ac = de 0,02 à 0,16
MICAS (muscovite)	Ac = 0,23
CACITE	Ac = 0,18

GROUPE	RANG D'ACTIVITE	FORMATIONS
INACTIF 1	- 0,50	- Sol à fraction argileuse - kaolinites - Argile fini-glaciaire - Argile dérivant d'érosion mécanique - Argile marine postglaciaire ayant subi un lessivage par eau douce.
INACTIF 2	0,50 à 0,75	- Argile résultant de l'altération normale - Argile déposée en eau douce.
NORMAL 3	0,75 à 1,25	- Argile marine à illite dominante. - Argile postglaciaire, argile d'autre période géologique.
ACTIF 4	1,25 à 2,00	- Argile plus matières organiques.
ACTIF 5	Plus de 2,00	- Argile avec montmorillonite au sodium dominante.

eau, ce qui permet de calculer le degré de sensibilité du sol "St". La sensibilité est un paramètre supplémentaire utile à la détermination de la nocivité d'un sol et de sa susceptibilité au glissement. Une argile sensible a toutes les chances de se mettre en mouvement brusquement et d'intéresser des volumes importants ; les Scandinaves et les Canadiens s'efforcent de cartographier les zones à argile sensible et font systématiquement des études de sensibilité avant tous travaux.

II°, D - 2 - 2 - Les essais in situ.

Ces essais permettent de vérifier et compléter les mesures de laboratoire. Mais en aucun cas ils ne sauraient les remplacer totalement et l'interprétation des résultats doit se faire avec circonspection. Dans certains cas de prélèvement difficile ou de mauvaise qualité, ils deviennent obligatoires. Comme essais principaux, nous mentionnerons rapidement :

a) les essais de pénétration. Que ce soit la pénétration statique ou dynamique (S.P.T. essai normalisé) on obtient des renseignements sur la compacité du sol et sur sa résistance en pointe. Une idée approximative de la compacité d'un sol peut être donnée par le comptage des coups de mouton pour enfoncer un tubage lors de sondages à la percussion.

b) les essais de cisaillement - Vane Test. Ils permettent de mesurer la résistance au cisaillement de terrains plastiques tels que les argiles et les vases - limons - silts.

c) les essais de pressiométrie. Ils consistent à mesurer la déformation du terrain en fonction de la pression radiale que l'on exerce par l'intermédiaire d'une cellule déformable (procédé Menard), on observera ainsi la phase de déformation élastique, de déformation plastique et la phase de rupture.

II°, D - 3 - Les données dynamiques.

Outre les renseignements que l'on demande habituellement à la prospection sismique pour la découverte de structures profondes, la localisation du substratum, l'étude des vitesses de propagation des ondes longitudinales et transversales, elle permet d'apprécier un certain nombre de données physiques et mécaniques.

- L'auscultation sismique met en évidence la plus ou moins grande décompression et désorganisation d'un massif rocheux. Des essais effectués en Italie sur le versant du Mont Toc avant et après le glissement prémonitoire de 1960 avaient mis en évidence une variation notable du module d'élasticité du calcaire qui passe de 10^6 bars au début 1960 à 10^5 bars en février 1961 correspondant à une vitesse trois fois moindre. Ces résultats laissent déjà présager une désorganisation croissante du massif calcaire. On peut ainsi repérer dans un versant les zones à vitesses plus faibles traduisant une décompression plus forte du rocher, données très précieuses pour une étude de glissement dans des massifs stratifiés, ou non. Ceci a pu être vérifié dans le versant de Modane en rive gauche de l'Arc : ce versant de constitution très hétérogène pour lequel il était possible de délimiter approximativement des secteurs à vitesses faibles 1000 m/s constitués de roches décomprimées par rapport à un substratum relativement sain et à vitesses plus rapides 2500 m/s. Toutefois l'étude des vitesses a ses limites ; la distinction est beaucoup plus délicate, voire impossible dans le cas de coulée ou de glissement de débris reposant sur un substratum schisteux ou marneux.

- La connaissance des deux célérités transversales et longitudinales permet aussi de calculer le module d'Young et le coefficient de Poisson. On a construit une abaque donnant ces modules en fonction des vitesses, mais l'anisotropie enlève beaucoup d'intérêt au graphique notamment à l'échelle du terrain, car lors des déformations d'un massif stratifié fait d'assemblages de blocs, ce sont d'abord les surfaces de contact qui se déforment et la sismique se révèle encore incapable d'après certains à "prendre en compte de tels phénomènes".

- Les ondes transversales, étant des ondes de cisaillement, sont plus sensibles aux défauts du rocher ; ces ondes se décalent sensiblement au niveau des zones broyées et ont tendance à disparaître davantage que les ondes longitudinales. Cette atténuation varie beaucoup avec la fréquence ; le "spectre de fréquence reçu" est donc intéressant à étudier car il met en évidence les fissurations du rocher. B. SCHNEIDER (1) a analysé ainsi la qualité des massifs rocheux en comparant entre elles toutes les caractéristiques sismiques : vitesses, fréquences, perte d'énergie, timbre, à l'aide d'un matériel de petite sismique dont il a normalisé au maximum la mise en œuvre.

(1) - B. SCHNEIDER a écouté aussi de la même façon des glissements de terrain actif (communication orale).

II°, D - 4 - Conclusions.

L'étude de la nature mécanique du matériau nécessite des compétences particulières et l'emploi de techniques et de matériels qui sont affaires de spécialistes. Le rôle du géologue est alors de guider le mécanicien du sol dans le choix des essais et leur fréquence selon le problème à résoudre et l'état d'avancement de ses connaissances sur la géométrie du versant et du glissement lui-même. Etant l'homme de terrain il doit pouvoir modifier le programme établi en fonction de nouvelles découvertes et avoir le souci de rentabiliser au maximum les essais.

Pour être exploitable et donner une bonne image du site, l'étude géotechnique requiert l'analyse des propriétés mécaniques de chaque terrain traversé en sondage. Dans le cadre d'un glissement de terrain, il est nécessaire de comprendre "l'hétérogénéité en grand" des matériaux, la fréquence des mesures deviendra alors plus importante, dans le sens vertical.

+ cas des matériaux meubles, sols fins organiques ou non.

- . essai in situ tous les mètres.
- . prélèvement d'échantillon intact, non remanié tous les 2 à 3 m.
- . étude plus poussée des niveaux faibles : sable, tourbe, argile douce, niveaux immergés et des zones plus résistantes.

+ cas des terrains altérés.

- . différenciation mécanique des différents degrés d'altération : météorique superficiel, altération chimique profonde, rippage glaciaire.
- . étude des zones de passage.
- . étude du contact substratum - terrain de couverture altéré.

+ cas des massifs stratifiés.

- . analyse des volumes tendres et durs.
- . étude des propriétés des volumes jouant le rôle d'interlit.

Il importe aussi de vérifier la continuité des propriétés et de la nature des matériaux aux abords du glissement. De plus, le géologue doit savoir lors de l'établissement des marchés que les divers essais (mécaniques et autres) font doubler sinon tripler le prix de revient du mètre linéaire de sondage, d'où la nécessité parfois de faire des sondages pilotes en petit diamètre et une prospection géophysique préliminaire avant d'arrêter un programme définitif.

II°, E - DONNEES METEOROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES.

Nous faisons entrer, à ce stade de nos investigations, le facteur temps, seul moyen d'appréhender l'évolution d'un versant dans des conditions données. Nous trouverons, par la même occasion, une justification supplémentaire du choix du bassin versant topographique comme cadre de l'étude d'un glissement.

L'analyse des données climatiques et hydrogéologiques tendra à la détermination du bilan hydrologique du bassin versant considéré et fondé sur l'examen des précipitations, des températures, du ruissellement, des infiltrations de l'évaporation et des ressources en eau souterraine.

II°, E - 1 - Précipitations.

Elles concernent aussi bien les précipitations liquides que celles solides que l'on enregistrera en fonction du temps. Pour ce faire, il existe un certain nombre d'appareils d'usage courant tels que les pluviomètres (simple ou totalisateur), les pluviographes (système enregistreur) etc...

On se servira du réseau existant qui a le mérite de fournir en général des observations de longues durées indispensables au calcul des moyennes pluviométriques, aux corrélations pluie-débit, à l'établissement de cartes isohyètes permettant de replacer le site étudié dans son contexte climatique.

Ce réseau pourra être complété par la suite par de nouvelles implantations d'appareils afin d'obtenir une meilleure précision.

L'étude très importante des corrélations précipitations - déplacements, nous amènera à prendre en considération non plus seulement des hauteurs d'eau ou de neige mais encore les notions d'intensité, de durée d'averse. Il est intéressant en effet de savoir si les mouvements de terrain sont déterminés par de fortes averses instantanées, par des

chutes de pluies faibles mais de longue durée, et quel sera le temps de réponse du sol à ces sollicitations susceptibles de modifier radicalement ou progressivement la pression d'eau interstitielle du sol.

On retiendra :

a) le classement des précipitations aboutissant à la détermination des maxima annuels - mensuels - journaliers. Ces valeurs représenteront soit le maximum de pluies tombées en une journée de 24 heures, pour un mois donné avec statistique en pourcentage des autres valeurs journalières ; soit les maxima de 2 - 3 - 4 - 5 ... jours consécutifs en relation avec le débit maximum et le plus haut niveau de nappe.

b) les relations intensité de pluie - durée, pourront se traduire sous la forme d'histogramme ou de courbe de précipitations cumulées. On détermine ainsi l'intensité de pluie (mm/h) pour un intervalle de temps donné : 15 - 30 min. - 1 h - 2 h - 3 h sur un graphique dont on tirera l'intensité maximum de l'averse.

c) les relations durée - intensité - fréquence.

II°, E - 2 - Les températures.

Ce facteur climatique est très important dès que l'on a affaire à des problèmes de reptation et de solifluxion. Le graphique du thermographe fourni en fonction du temps, les températures moyennes, maxima et minima. De la même façon que pour la pluviométrie, on examinera les relations intensité - durée de gel.

II°, E - 3 - Le ruissellement.

Les eaux en provenance des précipitations ou de fonte de neige atteignent les cours d'eau par quatre voies différentes :

- le ruissellement ou écoulement de surface,
- l'écoulement hypodermique,
- l'écoulement souterrain,
- les précipitations tombant directement sur les plans d'eau libre. Leur importance est assez faible pour qu'on puisse grouper cette quatrième composante avec la première.

Les trois premières composantes dépendent de nombreux facteurs tels que la perméabilité, la pente, la porosité, la structure du sous-sol (karst notamment), la vitesse de filtration ; de ce fait elles sont assez difficiles à apprécier. On se contente en général de mesurer le débit aux exutoires et notamment en amont du confluent du chevelu hydrographique avec le collecteur principal. On obtient ainsi le débit global transitant dans le bassin versant qui rapporté à la superficie (débit spécifique) fait apparaître en première approximation la notion de bassin déficitaire ou excédentaire. Une série de jaugeages, échelonnés sur les différents émissaires, permettra de se faire une idée approximative sur les sources d'alimentation ou les pertes.

Ces données pour être corrélables avec la pluviométrie doivent être enregistrées en continu avec l'aide de stations limnigraphiques tarées.

En outre il est bon d'avoir des estimations sur les débits solides, dans le cas de "torrent à affouillement" pouvant donner lieu à des coulées.

II°, E - 4 - Variation de niveau de nappe.

Les nappes peuvent influencer la stabilité d'un versant ; des mesures piézométriques fréquentes sont nécessaires. Leur fréquence est variable et déterminée par l'importance du glissement, par les conditions d'alimentation et le type de la nappe. Ces mesures aboutiront à l'établissement de carte de battement de nappe.

II°, E - 5 - Variation du plan d'eau libre.

De la même façon que pour les nappes, il est nécessaire d'enregistrer les variations de niveau des plans d'eau libre, nous pensons en particulier au retenue de barrage dont on contrôlera l'influence sur le versant.

II°, E - 6 - Végétation.

On se bornera à indiquer les grandes zones de végétation : forêts, taillis, prairies, cultures.

La végétation peut être un excellent indicateur de mouvements ; la forme de certains arbres (arbres en tuyau de pipe) est significative des déplacements de sol, toutefois, il est bon de se rappeler qu'en montagne, cette courbure peut être due à la poussée de la neige.

La présence de buissons espacés à l'intérieur d'une forêt de feuillus dénote souvent des mouvements de solifluxion. R.L. IVES (1941) différencie à l'aide de photos infra-rouges et d'observations du sol sur une épaisseur plus ou moins grande de stables et instables. Nous avons remarqué souvent aussi que la dislocation en eau des plantes (en particulier évaporation plus forte). Ceci se traduit par une différence de teinte dans la végétation herbacée qui a tendance à jaunir aux endroits en mouvement.

II°, E - 7 - Conclusions.

L'eau étant une des causes principales des glissements, il importe d'étudier son évolution dans le temps à la surface et à l'intérieur du versant. Une étude hydrologique et hydrogéologique à la mesure des problèmes à traiter et de leur gravité ne peut donc être considérée comme superflue. Elle permet une meilleure compréhension du déclenchement des mouvements de terrain, de leur répétition, en particulier dans le cas de coulées. En outre, elle est la base de toute étude de correction que l'on pourrait envisager : correction de torrent, protection de berge, dimensionnement des ouvrages de drainage, de soutènement.

II°, F - HISTOIRE GEOLOGIQUE ET RECENTE DU SITE.

L'histoire géologique, ancienne ou récente commande la géométrie du versant et contribue à expliciter l'histoire des différentes contraintes auxquelles il a été soumis.

Elle représente la synthèse de toutes les observations et renseignements glanés par le géologue en vue de répondre à la question suivante : peut-on considérer qu'un versant ayant subi au cours de son histoire géologique des contraintes et déformations très importantes, puisse rester en équilibre stable ou instable tant qu'on ne lui imposera pas de contraintes plus fortes. La solution partielle au problème se trouve dans :

- l'histoire géométrique interne (mode de dépôt, tectonique évolutive, paléotectonique, paléogéographie) ;
- l'histoire fluviatile ;
- l'histoire glaciaire ;
- l'histoire climatique et celle de l'altération ;
- l'histoire sismique ;
- les interventions humaines.

II°, F - 1 - L'histoire de la géométrie.

L'attention sera attirée sur :

- l'épaisseur, la forme des dépôts et leur genèse ;
- les glissements, leur intensité, leur forme, bouleversant les propriétés des matériaux vis à vis de la pesanteur et pouvant accroître leur sensibilité au fauchage ;
- les contraintes très fortes imposées au versant lors de chevauchement, charriage, effondrement, métamorphisme, volcanisme etc...
- la présence de glissements anciens occasionnant une dislocation des matériaux et une surcharge pour le versant.

I.V. POPOV, s'appuyant sur des observations de glissements actuels, en relation plus ou moins directe avec des régions tectoniquement homogènes, a tenté de faire des corrélations avec différentes phases tectoniques.

- La pénéplanation, succédant à un soulèvement maximum, se traduit par des écroulements dans les régions montagneuses et par des écroulements et glissements sur les côtes.

- Dès que la transgression commence par suite de mouvements négatifs sur la pénélaine, les écroulements diminuent pour laisser la place aux "slumps" liés au début de creusement des vallées.
- Au cours d'une transgression généralisée, le "slump" se généralise par la prédominance de l'érosion latérale des fleuves.
- Pendant le développement maximum d'une orogénie - surrection - plissement - activités volcaniques, les "slumps" disparaissent pour faire place aux écroulements et aux coulées.

II°, F - 2 - L'histoire fluviatile.

Les cours d'eau représentent un des agents de façonnement le plus actif. L'histoire de leur implantation sera un complément indispensable à la détermination des circulations d'eau profondes et superficielles. Quatre problèmes retiendront plus particulièrement notre attention :

II°, F - 2-1 - L'établissement du réseau hydrographique général permet d'expliquer la géométrie des différents volumes géologiques : surface d'érosion irrégulière et creusée de chenaux, surface d'accumulation, cône de déjection.

II°, F - 2-2 - Les variations du profil d'équilibre des cours d'eau selon celles du niveau de base, ont déterminé des variations dans la compétence des rivières, donc dans ses capacités d'érosion et d'affouillement.

II°, F - 2-3 - De nombreuses pentes raides ont été formées par les rivières. La hauteur des versants varie donc de 0 à la valeur actuelle ; l'approfondissement de la vallée étant accompli pratiquement entièrement par l'érosion fluviatile, la largeur du fond reste inchangé pendant tout le début de l'érosion. La plupart des massifs rocheux possèdent encore à ce moment-là une cohésion efficace importante (Ci) et peuvent donc être stables en talus verticaux dont la hauteur maximum (H₀) est déterminée par la cohésion et la fissuration.

Au cours de l'approfondissement progressif, la hauteur de paroi augmentant, les contraintes de cisaillement de la roche voisine s'accroissent, donc la cohésion efficace diminue et il y a un début d'éclatement dans le rocher. Dès que la hauteur du talus augmente au-delà de H₀, une portion se transforme selon une image de TERZAGHI en un "agrégat sans cohésion de blocs plus ou moins réguliers s'ajoutant les uns aux autres". Le talus va donc reculer suivant un angle constant par un procédé de régression favorisant la chute de blocs soit par écroulement soit par glissement de roches. Par la même occasion, les cours d'eau affluents descendant des versants tendront à recouvrir un profil d'équilibre imposant des contraintes supplémentaires au massif.

II°, F - 2-4 - Les phénomènes de surimposition ou d'épigénie ont deux effets principaux :

- des accumulations plus importantes de matériaux meubles ;
- une possibilité d'alimentation en eau plus importante.

II°, F - 3 - L'histoire glaciaire.

Les glaciers représentent aussi un facteur important d'érosion en modifiant les formes existantes.

II°, F - 3-1 - Ils ont modelé les versants à forte pente leur imposant ainsi de très fortes contraintes latérales. Lors des retraits successifs (retrait en fin de cycle ou à l'intérieur d'un même cycle), les matériaux auront tendance à libérer par processus de décompression, une partie des contraintes emmagasinées. De plus la fusion de la glace provoque une suppression de butée brutale en pied de versant, d'où l'explication de certains grands glissements anciens ayant disloqué les différents terrains.

II°, F - 3-2 - Les glaciers par leur poids sont responsables d'une surconsolidation des matériaux, or on sait que la cohésion d'une argile est proportionnelle à la préconsolidation, d'où la nécessité d'une connaissance approchée de l'épaisseur de glace et de sédiments déposés sur la couche consolidée.

II°, F - 3-3 - Une autre conséquence, souvent néfaste de l'action des glaciers, est l'existence fréquente de cuvette à remplissage argileux ou argilo-sableux indiquant l'emplacement de lacs sous ou périglaciaires. Il importe donc de détecter ces cuvettes argileuses supportant des terrains plus récents et préjudiciables à plus ou moins long terme à la stabilité d'un versant. De telles dispositions se rencontrent fréquemment dans le bassin du Rhône et de l'Arve, engendrant des phénomènes de solifluxion et des glissements profonds lors d'entailles naturelles ou artificielles.

II°, F - 3-4 - Enfin, dans les versants situés à haute altitude, il sera utile de connaître l'état des glaciers actuels, progression - retrait - crue glaciaire.

II°, F - 4 - L'histoire climatique et de l'altération.

Elle nous conduira à étudier l'influence des cycles climatiques sur les matériaux, en particulier sur la genèse de l'altération.

Suivant les périodes chaudes, froides, humides, sèches, hydrolysantes et l'intensité d'action, les matériaux s'altèrent plus ou moins complètement et profondément en argile.

Les glaciers peuvent contribuer aussi à l'altération des roches en place sur des épaisseurs non négligeables par leur action de compression - décompression - humidification - "rippage". Les marnes et schistes sont très sensibles à ces actions et sont souvent impliqués dans des glissements de débris ou des coulées.

II°, F - 5 - L'histoire sismique.

Les tremblements de terre étant une des causes instantanées du déclenchement des glissements, il est nécessaire de replacer le versant étudié par rapport aux zones sismiques si faibles soient-elles et de suivre les enregistrements des stations sismiques régionales.

Les Japonais et les Russes, dans leur station d'études de glissements, surveillent attentivement l'évolution des versants lors de secousses même de faibles amplitudes.

II°, F - 6 - Les interventions humaines.

Par enquêtes auprès de la population et des services techniques compétents, on dressera l'inventaire des ouvrages mis en place par l'homme.

- les ouvrages de stockage ou de transport d'eau telles que les retenues de barrages (petites ou grandes), les canaux, les conduites, les galeries d'amenée d'eau dont il faudra contrôler l'étanchéité.
- les voies de communication susceptibles de remettre localement en question la stabilité du versant entaillé.
- les décharges et zones de remblais.
- les mesures préventives ou correctives mises en œuvre antérieurement.

II°, G - CONCLUSIONS.

L'étude complète du site fait donc appel à toutes les disciplines de la géologie et de la géotechnique. Suivant la gravité et l'importance économique du glissement, elle peut être réduite dans le temps et l'espace, cependant toute enquête doit dépasser nettement le cadre du glissement lui-même. Des moyens d'investigations profondes doivent être implantés de manière à obtenir le maximum de renseignements, sans qu'il soit nécessaire pour autant de quadriller entièrement la zone étudiée et de faire croître dans des proportions importantes le coût des recherches. On cherchera, avant tout, à utiliser de façon rentable, les travaux existants ; forage de recherche d'eau, puits fermier, tranchée, tunnel, carrières. Par contre l'échantillonnage devra être très soigné.

Cette phase d'étude que l'on peut mener de concert avec celle du glissement lui-même fournira les données de base utiles à l'élaboration de la carte géotechnique du bassin versant sur laquelle apparaîtront les différentes causes lointaines ou finales du glissement, à prendre en compte dans les calculs de stabilité. Cette carte géotechnique est en fait la synthèse de plusieurs autres cartes : lithologique, morphologique, hydrogéologique, tectonique, mécanique.

III° - DESCRIPTION PRECISE DU GLISSEMENT.

L'étude de l'environnement immédiat du ou des glissements à surveiller permet dès lors d'aborder la description précise des mouvements, de ses limites, de ses formes, des transformations qu'ils causent à la géométrie et à la nature des matériaux du versant, de son régime hydrogéologique propre et surtout de son évolution dans le temps. Les études du site et du glissement peuvent d'ailleurs être menées de front et d'une façon comparée.

A ce stade, nous abordons le domaine des cartes et plans à grande échelle indispensables au report précis et ordonné des nombreuses observations effectuées sur le glissement de terrain lui-même. Nous insisterons un peu longuement sur ce sujet en introduction car il conditionne le travail du géologue appelé à s'occuper de tels problèmes ; nous avons pu en effet nous rendre compte personnellement des difficultés sinon de l'impossibilité qu'il y a à faire un travail sérieux de recherche d'indice de glissement sans support cartographique adéquat et précis, et certaines de nos études que nous ne pouvons publier toutes au cours de cette synthèse ont eu à en souffrir.

Les échelles courantes à employer selon l'importance des mouvements sont le 1/5000, le 1/2000, le 1/1000 et le 1/500. Les plans doivent mettre en évidence les différentes caractéristiques du glissement : limites, crevasses, fissures, ruptures de pente, creux etc... et c'est pourquoi le géologue chargé de l'étude devra suivre de très près l'élaboration de ces cartes et participer même aux travaux de terrain des brigades topographiques. Cette conduite aura l'avantage non négligeable de lui permettre de prendre connaissance en détail de l'aspect de surface du glissement, et d'expliquer aux topographes le pourquoi de ses exigences.

Un lever topographique doit faire apparaître :

a) les limites du glissement qu'il s'agisse de points durs, de cours d'eau ou de toute autre forme morphologique supposée stable et encadrant la zone en mouvement.

b) l'allure et la succession précise des courbes de niveau qui doivent permettre de distinguer en première approximation les bourrelets et les zones plates. Cette précision peut paraître souvent très aléatoire en regard de l'échelle adoptée (le 1/1000 ne suffit pas toujours à faire apparaître d'une façon satisfaisante et détaillée les ruptures de pente). Il est nécessaire alors au cours des opérations de terrain de faire une série de cheminement suivant la ligne de plus grande pente afin de tracer des profils topographiques précis. Cette opération ne peut guère s'effectuer à des échelles plus petites que le 1/100 ou le 1/200 (le 1/500 dans certains cas, coulées de boue très allongées, bourrelet très marqué, peut être employé).

c) Les différents repères topographiques habituels : chemins, murs, poteaux, maisons etc... Ils doivent être soigneusement répertoriés car ils représentent souvent les seuls points de repère valables pour les opérations cartographiques à venir notamment lorsqu'on se trouve en zone forestière ou de taillis. De plus ils peuvent servir de témoins de mouvement ; à cet égard il est bon aussi de faire noter, s'il y a lieu, les gros blocs erratiques.

d) les dépressions de quelques dimensions qu'elles soient, représentant souvent des zones de stagnation et d'infiltration.

e) la géométrie des circulations d'eau superficielles, sources, ruisseaux, marécages, zone de suintement, zones à végétation hydrophyle.

f) les principaux indices de glissement : fissures, niches d'arrachement, crevasses, bourrelet frontal. Le rôle du géologue devient alors prépondérant car il a la charge d'expliquer au topographe l'indice ou le groupe d'indice dont il désire une cartographie précise, les autres étant repérés par rapport à des piquets ayant servi à la polygonation et dûment numérotés et cotés sur le terrain et sur le plan.

g) il peut être demandé aussi au topographe, dans des cas simples, de noter les limites de terrains, les éboulis, les zones à gravier etc...

h) On dessinera enfin un carroyage rattaché au Lambert ou relatif afin de pouvoir délimiter d'une façon simple les différentes zones du glissement et situer les déplacements des témoins.

Malgré un prix de revient assez élevé dans le cas de glissement important, le résultat final se traduira par une économie de temps sur les opérations cartographiques suivantes et par l'obtention d'un document très précis utile par la suite à l'élaboration et au dimensionnement des ouvrages de stabilisation. Un des seuls inconvénients, et non des moindres cependant, réside dans les grandes dimensions de tels plans qui seront difficiles à manier dans leur totalité sur le terrain.

A l'époque de la photogrammétrie, un bon lever stéréophotogrammétrique remplacera avantageusement certaines des opérations de terrain et offre l'avantage de pouvoir suivre l'évolution du glissement dans le temps au moyen de prises de vue régulières et faciles à comparer.

III°, A - LOCALISATION DU GLISSEMENT ET HISTORIQUE.

Il s'agit ici uniquement de la localisation topographique de la zone en mouvement sur carte au 1/20 000 ou sur tout autre plan ayant servi à l'étude du site. Elle sera utilement indiquée, comme il est mentionné dans la fiche jointe, par rapport aux voies de communication et par les coordonnées d'un point central du glissement. Si un ou plusieurs mouvements de terrain ont déjà eu lieu dans la région, une enquête historique se révèle intéressante pour la compréhension de l'histoire du matériau, de la géométrie observable actuellement, du mode de rupture et pour la détermination de la fréquence de mouvement.

Une enquête auprès des habitants et des services techniques est toujours utile même si les renseignements recueillis sont fragmentaires et font plus appel au côté anecdotique que scientifique de la rupture. Les paysans en particulier peuvent fournir des données précieuses sur l'évolution et la durée des différentes phases, ce sont eux en effet qui savent à partir de quel moment ils ont été obligés par exemple d'abandonner les cultures à cause de la formation de bourrelets ou à quelle période les fissures et les crevasses ont commencé à fragmenter le terrain.

III°, B - GEOMETRIE DU VOLUME EN MOUVEMENT.

III°, B - 1 - Géométrie externe actuelle.

Cette étude portera essentiellement sur la détermination de 4 paramètres.

a) Les dimensions de la zone en mouvement, sa superficie, les cotes de la tête et de l'extrémité inférieure de la masse glissée. Lors d'étude statistique il est commode d'exprimer les dimensions des zones en mouvement par trois longueurs :

- la composante horizontale (H C) représentant la distance horizontale entre le pied et la tête du glissement ;
- la composante verticale (V C) représentant la différence d'altitude entre le pied et la tête du glissement ;
- la composante latérale (L C) (largeur) représentant la distance maximum d'un bord à l'autre du glissement, distance mesurée parallèlement au versant.

Deux de ces composantes peuvent être mises sous forme d'un rapport $\frac{HC}{VC}$ que les américains ont retenu

comme significatif des pentes instables. Des statistiques ont mis en évidence que ce rapport pouvait être corrélé avec la pente originelle du versant, le matériau, les circulations souterraines, le pourcentage de submersion. F.O. JONES et D. EMBODY ont même élaboré une formule permettant de calculer ce rapport et de faire des comparaisons entre les versants stables et ceux ayant glissé et partant d'en déduire d'une façon approchée la distance maximum jusqu'à laquelle le glissement peut reculer dans le versant (dans le cas présent la distance est comptée à partir de la rivière Columbia et du lac de barrage F. ROOSEVELT). Cette formule fondée sur une étude statistique de 300 glissements tient compte de variables jugées significatives et représentatives des versants observés et de coefficients de régression tirés directement de l'analyse statistique : son expression est la suivante :

$$Y = 0,6328 + 0,2460 X_1 - 1,4121 X_2 + 7,5583 X_3 + 1,0338 X_4 + 0,4015 X_5.$$

Y = Logarithme du rapport HC/VC du glissement.

X₁ = Pourcentage de submersion (transformé en angle équivalent).

X₂ = Pente originelle du versant (transformé en valeur logarithmique). $(1 = \log)^2$

X₃ = Pente originelle du versant (transformé en valeur quadratique : $\frac{1}{10}$)

X₄ = Circulations souterraines (facteur auquel les auteurs ont attribué la valeur = 0 pour des circulations peu importantes - et la valeur = 0,1 pour des circulations importantes).

X₅ = Matériaux (les auteurs ont groupé pour l'occasion les matériaux en 5 rubriques et leur affectent des valeurs différentes : matériaux classés de 1 à 3 inclu, leur valeur est comptée + 0,1 ; matériaux de la catégorie 4, valeur retenue = 0 ; matériaux de la catégorie 5, valeur retenue = - 0,1).

F.O. JONES et D. EMBODY obtiennent ainsi une valeur approchée de HC/VC.

- en soumettant cette valeur à des tests de probabilité, ils obtiennent un rapport HC/VC valable dans 95 % des cas.
- en l'affectant de coefficients pessimistes, ils en tirent une valeur maximum donnant le risque maximum de recul du glissement.

Nous avons cité cette équation à titre d'exemple, il est évident qu'elle n'est valable en grande partie que pour la région citée (terrasse de la rivière Columbia) et que toute transposition aux Alpes, par exemple, dans une ancienne vallée glaciaire nécessiterait sans aucun doute d'autres corrélations faisant intervenir des facteurs d'instabilité différents (notamment fracturation, climatologie, érosion, structure, interventions humaines).

Nous formulerons enfin quelques remarques pratiques : ce rapport HC/VC pourrait être assimilé à un autre rapport bien connu qui sert à exprimer la pente d'un talus, et ce d'autant plus facilement que dans l'acceptation américaine ces deux valeurs représentent la cotangente de l'angle de talus. La notation française permet de faire la différence entre le HC/VC et la pente moyenne d'un talus représentée alors par la tangente. Si ces deux rapports semblent avoir une signification assez similaire on ne peut cependant se dispenser de faire les deux mesures séparément.

De plus, ce rapport HC/VC n'est pas toujours facilement mesurable notamment dans le cas de coulée du type earthflow ou mudflow.

b) La pente de la surface topographique du glissement sera le deuxième paramètre quantitatif et justifie l'établissement de coupes topographiques précises selon la ligne de plus grande pente et la direction de mouvement. A côté de la pente moyenne calculée ou mesurée sur le terrain, il est bon de mentionner sous forme de tableau ou autre les valeurs maxima et minima et les variations de pente (replats) de la même manière que dans l'étude du site.

c) Les limites morphologiques du glissement sont plus difficilement quantifiables. Elles peuvent être de types divers : massif rocheux, talweg, cône de déjection, terrasse. On différenciera celles qui jouent un rôle stabilisant et celles qui, au contraire, peuvent contribuer à la réactivation permanente des mouvements (torrent, rivière). Il est intéressant de leur affecter une longueur représentant la distance sur laquelle leur action stabilisante ou déstabilisante est effective.

d) L'allure et la forme de la surface du sol ; tous les bourrelets, fissures, crevasses, doivent être cartographiés, répertoriés s'il y a lieu suivant leur direction longitudinale (dans le sens du mouvement) ou transversale.

La description des indices de glissement, dont nous avons les formes de détail au chapitre III°, rassemblera les données suivantes :

- le groupement ou non en séries des indices transversaux ou longitudinaux ;
- la forme en plan des fissures et crevasses : droite, courbe, en arc de cercle concentrique ;
- la répétition régulière ou non de ces indices, notamment des bourrelets ;
- la position et l'orientation dans le volume en glissement ;
- la longueur, largeur maximum, minimum, moyenne ;
- la profondeur moyenne des fissures et crevasses ;
- le décalage vertical entre les deux lèvres de la crevasse ;
- l'aspect du mur de la crevasse : lisse, présence de cannelures, de stries de friction, aspect rugueux, broyage ;
- état des lèvres supérieure et inférieure : arrondies, aigües ;
- matériaux tombant ou non dans la crevasse et tendant à la remplir ;
- comportement hydrogéologique : présence de suintement, crevasse permettant l'infiltration et occasionnant des pertes de ruisseaux ;
- déplacements horizontaux et verticaux en fonction du temps, le long de ces fissures et crevasses ;
- relation et comportement en fonction des différents terrains affectés.

Ceci aboutira soit à une carte géomorphologique d'indices de glissement avec individualisation de chaque indice, soit à l'établissement de carte de densité de fissuration ce qui permet une meilleure compréhension de l'ensemble car souvent la dislocation est telle qu'elle ne permet plus la distinction précise des indices.

III°, B - 2 - Géométrie interne actuelle.

Les éléments intéressants à noter sont au nombre de quatre.

a) La disposition des terrains et notamment les bouleversements apportés à la succession normale des couches du versant, aux valeurs de pendage, de direction, aux épaisseurs normales.

b) La présence éventuelle d'une ou plusieurs surfaces de glissement. Il importe avant tout de savoir s'il peut exister une surface ou une zone de faiblesse suffisamment continue pour autoriser des déplacements de masses de terre plus ou moins importantes.

Un versant soumis à la solifluxion généralisée et obéissant donc à des déformations plastiques s'exerçant à l'intérieur d'une masse argileuse ne possède pas a priori de surface de glissement définie couvrant toute l'étendue en mouvement.

Dans tout autre type de mouvement, il existe en général une ou plusieurs surfaces ou zones de faiblesse, souvent non visible en totalité mais que l'on peut raisonnablement déduire et essayer de localiser grâce à l'observation des formes de tête et de pied de glissement, l'étude détaillée des pourcentages de carottes de sondage (1) ou à la connaissance que l'on a de la géométrie interne du versant. Une analyse précise des propriétés mécaniques sur une même verticale peut aussi permettre de localiser des zones de moindre résistance.

Cinq paramètres entrent en ligne de compte :

- l'apparition de zones de faiblesse soit dans un versant à constitution hétérogène soit dans une masse de matériau homogène, peut avoir plusieurs origines dérivant en grande partie de sa géométrie interne et externe d'où l'importance prioritaire à donner à la compréhension de la structure. Nous avons résumé les principales origines dans le tableau n° 36.
- les surfaces de glissement peuvent être de formes diverses suivant leur origine ; toutefois elles peuvent se rattacher à deux grands types qui nous l'avons vu, servent de critère de classification.

+ une forme plane, plus ou moins parallèle à des lignes structurales connues. Elle prédomine dans les glissements de roches, de blocs, et d'une façon générale, dans les mouvements affectant des versants stratifiés conformes. Le mode de déplacement sera une translation (2).

+ une forme courbe que beaucoup assimilent à un cercle expliquant ainsi le mouvement de rotation d'arrière en avant, mais cette hypothèse commode de calculs de stabilité de talus est somme toute relativement rare dans la nature et ne peut guère être admise que dans les cas de talus édifié de toute pièce par l'homme. On parle plutôt, à l'heure actuelle de forme en "fauteuil", forme que l'on retrouve dans de nombreux glissements en argile sensible, dans les glissements de débris. Une telle surface est composée de deux éléments : un "dossier" relativement pentu (à Vajont Longarone, la pente varie de 35 à 45°, à Léaz elle atteint un maximum de 25°) et un "siège" peu incliné sinon subhorizontal. Cette forme conditionne effectivement en tête du glissement un mouvement se rapprochant de la rotation qui laisse dans la nature son empreinte, en l'occurrence une niche d'arrachement ou un escarpement principal très redressé ; mais le reste du mouvement est plus une translation.

Nous ne nions pas cependant dans certains cas (autre que les glissements de talus artificiel) qu'il puisse exister "un mouvement de rotation" ; nous avons pu observer ainsi de très belles loupes de glissement avec soulèvement frontal.

- Quant au nombre, plusieurs cas peuvent se présenter :

+ une surface de glissement unique, définie comme dans la plupart des "slumps" naturels ou artificiels, dans les glissements de blocs, les coulées de type "earthflow" ou "mudflow", les glissements à étalement latéral.

(1) - Une étude détaillée des sondages portant sur les baisses de pourcentage de carottes, sur la fracturation et sur les traces de circulation d'eau peut permettre de localiser approximativement une surface de glissement.
 (2) - Ces lignes structurales peuvent être, soit des fractures, soit des plans de stratification, soit des limites de témoins différents.

TABLEAU N° 36 - ORIGINE DES SURFACES DE GLISSEMENT

ORIGINE	TYPES DE MOUVEMENTS	ORIGINE	TYPES DE MOUVEMENTS
FAILLE - FRACTURE majeure ou mineure	- oriente et induit la présence de surfaces de faiblesse de forme diverse - peut constituer la limite entre zone stable et instable - affecte tous les types de mouvement (très important dans écoulement et glissement de masses rocheuses)	LIMITE SUBSTRATUM TERRAINS DE COUVERTURE	- discontinuité dans les propriétés mécaniques. - substratum jouant le rôle de "glissoir" (action importante des circulations d'eau). Forme de la surface de glissement unique variable, souvent prédominance de la translation. - suivant épaisseur des terrains de couverture : - glissement de débris (plus de 5 m d'épaisseur) - reptation (manteaux de débris peu épais) - peut constituer la partie "siège" d'une surface de glissement en "fauteuil" dans les slumps.
PLANS et JOINTS de STRATIFICATION	- fragmentation potentielle des matériaux du substratum (corps de maçonnerie de K. TERZAGHI) - suivant la pente conditionne : a) le fauchage et les tassements de couches (pendage vertical ou inverse fort) b) les mouvements de translation selon des surfaces de glissements parallèles, planes dans glissements de roches, de blocs (pendage conforme) - propriétés spéciales des matériaux contenus dans ces plans et joints.	LIMITE TERRAIN DUR TERRAIN TENDRE	- grande hétérogénéité des propriétés mécaniques : terrain plastique supportant terrain dur et pesant. - en général surface plane, mouvement de translation, glissement de masses rocheuses (influence de la pente de cette limite et des circulations d'eau). - zone de faiblesse dans le niveau argile moule ou sensible. Mouvement de translation dominant. - forme générale de surface de glissement en "fauteuil" - pente non influente (surface souvent subhorizontale) - rupture brusque et rapide - discontinuité dans propriétés mécaniques (résistance moindre) - affecte les masses argileuses et en particulier les argiles sensibles ; mouvement du type étalement soudain ou coulée.
SCHISTOSITE ET FOLIATION	- plusieurs surfaces élémentaires de faiblesse dominant au total une zone de faiblesse généralisée d'épaisseur variable. - mouvement de masse suivant surface complexe (forme circulaire + forme plane parallèle) dans slump et glissement de débris - mouvement différentiel, superficiel, lent : reptation - affecte schistes, marnes, micaschistes du substratum. - action très sensible dans couches schisteuses ou marnieuses altérées (glissement de débris) - influence de la pente de cette schistosité et des autres systèmes de fissures.	LIMITE ARGILE MOLLE ARGILE TENACE ARGILE SENSIBLE	- varves sableuses = niveaux de moindre résistance et de haute pression interstitielle. - plusieurs surfaces élémentaires ; mouvements différentiels de translation dominant, solifluxion de plaques induisant la solifluxion à griffures et déchirures. - apparition quasi instantanée d'une surface courbe (forme circulaire ou en arc d'ellipse) au sein d'un matériau homogène (argileux ou sableux). - mouvement principal : "rotation" d'arrière en avant.
		TALUS DANS MATERIAUX HOMOGENES.	- elle peut jouer le rôle de surface de glissement ou d'écoulement ; dans les coulées de tous types, dans les "terris en marche". - mouvement de translation, en général. - forme irrégulière (fond de talweg). - influence de la pente, circulations d'eau, de la végétation (non débroussaillage d'une pente).
		SURFACE TOPOGRAPHIQUE	

+ il peut y avoir aussi plusieurs surface de faiblesse jouant différentiellement les unes par rapport aux autres. Ce peut être le cas des plans de stratification dans les glissements de roches, des alternances argile molle - argile tenace - argile varvée. La présence de plusieurs couches de terrain de moindre résistance doit obligatoirement susciter des investigations profondes et un contrôle des déplacements en profondeur de manière à délimiter les différentes hypothèses ayant trait aux cubages de matériaux instables depuis la plus optimiste jusqu'à la plus pessimiste.

+ enfin dans certains cas il n'existe pas de surface de glissement nettement définie, on a affaire à une somme de petites surfaces élémentaires glissant les unes sur les autres et constituant ce qu'il est préférable d'appeler "zone de faiblesse". Il en est ainsi souvent pour les glissements de débris et d'une façon générale pour les glissements dans les schistes. Dans une masse argileuse, un horizon sensible suffit à créer une telle zone dangereuse.

- la pente de la surface de glissement constitue un autre paramètre important à connaître. Dans la mesure du possible, elle sera mise en parallèle avec la pente de la surface topographique et avec celle des couches de terrain (fig. 65).
- la localisation sera le dernier facteur à analyser, il conditionne les hypothèses de cubage, mais il est malheureusement difficile à déterminer dans de nombreux cas. On est souvent réduit, particulièrement dans une masse relativement homogène du point de vue géométrique, à dessiner des tracés hypothétiques qu'il faut par la suite vérifier par sondages et tubes de déformation. Quand on a affaire à une superposition de terrains de nature et donc de propriétés différentes (argile sur calcaire ou le contraire, gravier sur argile etc...), il est raisonnable de penser que les limites entre terrain peuvent constituer d'éventuelles surfaces de faiblesse, comme nous l'avons fait pour le glissement de Léaz en choisissant des hypothèses correspondant respectivement aux contacts gravier (limite supérieure) argile - gravier (limite inférieure).

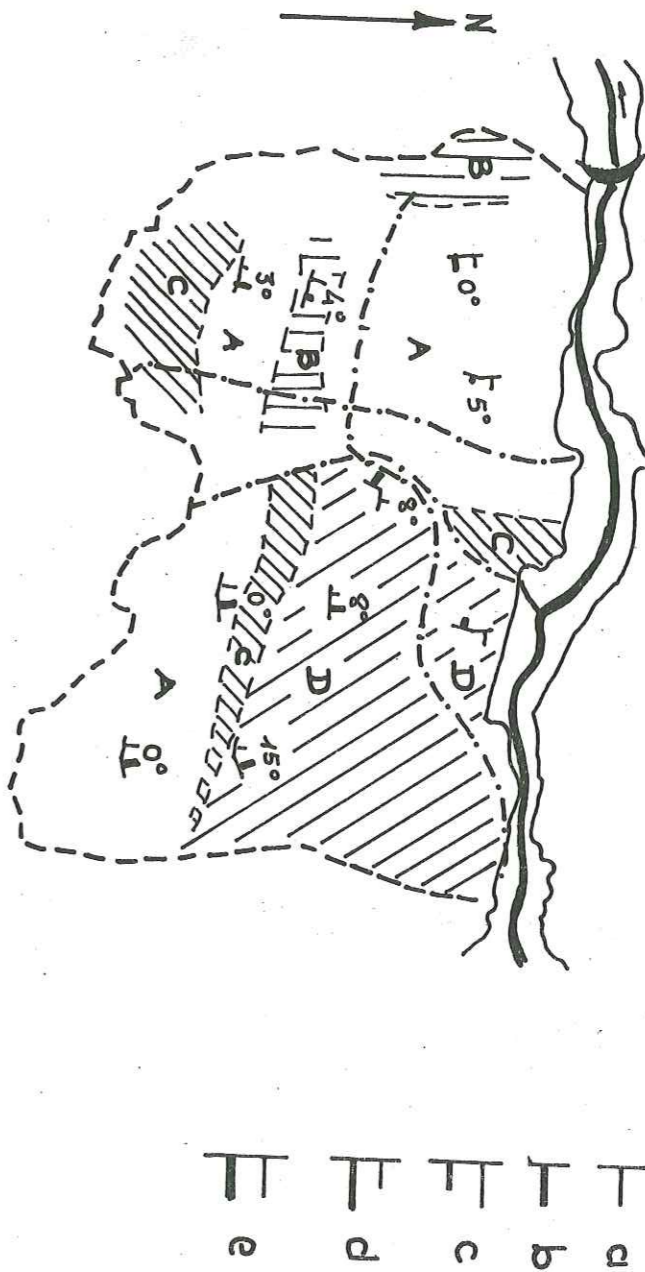
Il faut noter aussi que la surface de glissement majeure peut ne pas rester sur tout son parcours dans la même formation géologique ou dans la même strate ; c'est le cas de Vajont Longarone où elle emprunte plusieurs strates et terrains différents, la plus grande partie se trouvant toutefois cantonnée dans les calcaires du Malm.

Ces différentes données seront reportées sur des plans qui, selon l'état des connaissances feront apparaître les courbes de niveau, la forme générale approchée de la surface de rupture ainsi que les pendages comparés à ceux des couches et de la surface topographique, ou à défaut les limites profondes des terrains susceptibles de glisser. De plus elles permettront de répondre, le cas échéant, aux questions suivantes :

- . Quel cubage moyen et maximum faut-il s'attendre à voir glisser ?
- . Dans quel matériau peut-il y avoir rupture ?
- . A quelle profondeur faudra-t-il drainer pour empêcher l'eau de "lubrifier" la surface de glissement ?
- c) Comment le matériau disloque-t-il ou glisse-t-il ?
- . Y a-t-il fragmentation importante, déplacement de la masse ou au contraire sont-ce les mouvements importants qui provoquent la fragmentation ?
- . Les déformations plastiques l'emportent-elles sur les mouvements cassants, y a-t-il formation de bourrelets ?
- . D'une façon générale, comment les fissures évoluent-elles ? Une fissure s'ouvrant largement avant de se cisailier indiquerait un mouvement relativement superficiel, ceci peut correspondre aussi à une action prépondérante de la pesanteur (appel au vide dans les écroulements et les phénomènes de fauchage), ou à un obstacle dans le cheminement d'une coulée. Une fissure se cisillant sans qu'il y ait ouverture importante des deux lèvres signalerait des mouvements plus profonds.
- . Le mouvement général se rapproche-t-il plus de l'écroulement, du glissement proprement dit, de la coulée, du décollement de plaque, de la solifluxion à déchirures ou à bourrelets ?
- . Y a-t-il mouvement rétrograde ? Quelle est la part de l'érosion régressive ?

Toutes ces considérations sont à préciser et à corrélater en fonction des études et contrôles des déplacements.

Fig. 65 Glissement de Vajont Longarone : relations entre le pendage de la surface de glissement et le pendage des couches.



5° : différence entre les deux pendages - Zone A : pendages concordants - Zone B : directions concordantes - Zone C : directions concordantes - Zone D : directions concordantes - pentes discordantes : surface de glissement plus inclinée que les couches - Zone C : directions concordantes - pentes discordantes : surface de glissement moins inclinée que les couches - Zone D : directions et inclinaisons discordantes

a - pendage des couches. - b - pendage de la surface de glissement. - c - couches moins inclinées que la surface de glissement. - d - couches plus inclinées que la surface de glissement. - e - couches aussi inclinées que la surface de glissement.

III°, C - TRANSFORMATION DU MATERIAU AU COURS ET APRES LA RUPTURE.

Comme dans le cadre de l'étude du site, l'analyse de la géométrie, de la nature, des propriétés des terrains instables, est indispensable. Les moyens de reconnaissance profonds (sondages, tranchées, puits) sont nécessaires et doivent permettre la prise de nombreux échantillons non remaniés et l'étude des matériaux in situ. Les résultats sont à comparer avec ceux obtenus dans les terrains environnants supposés stables. Le programme financier de reconnaissance sera d'ailleurs dressé de façon à laisser la plus grande part des crédits à l'étude propre du glissement, ceci bien entendu lorsqu'il s'agit de lutter contre un mouvement déjà amorcé ou laissant supposer une réactivation à la suite de travaux dans la zone dangereuse ; à elle seule cette phase d'étude représente le meilleur remède préventif.

L'étude des matériaux doit aussi servir de base au programme de contrôle des mouvements, au choix des remèdes de correction et à leur mise en œuvre. Les investigations porteront donc sur le comportement et les propriétés mécaniques des terrains dangereux (en particulier l'argile) et surtout sur les différentes surfaces de contact entre couche, les interlits et bien entendu sur les propriétés de la surface de glissement si elle a pu être repérée.

III°, D - COMPORTEMENT HYDROGEOLOGIQUE PROPRE AU GLISSEMENT.

Il doit être étudié avec le maximum de précision en vue de la compréhension des causes probables des mouvements et de l'élaboration s'il y a lieu d'un programme de drainage.

III°, D - 1 - Sources et zones de suintement.

On fera l'inventaire des points d'eau et des zones de suintements diffus avec leur débit moyen, les directions d'écoulement, la superficie de terrain affectée par les suintements. Les sources peuvent se disposer de deux façons principales :

- disséminées au hasard sur toute la surface du glissement ;
- groupées suivant des lignes de niveau, des alignements de fissures, à la base des bourrelets, au front du glissement.

En pays triasique, il s'avère nécessaire d'effectuer l'analyse chimique des eaux de sources pour contrôler les teneurs en sulfates responsables souvent de la "déflocculation" des argiles (d'après certains auteurs, l'ion le plus nocif serait le magnésium).

III°, D - 2 - Ruissellement.

On déterminera son importance par rapport aux infiltrations, les débits moyens, la pente des talwegs, la capacité d'érosion.

On observera aussi si le ruissellement est favorisé, détourné ou complètement obstrué par le glissement (les coulées importantes obstruent en général temporairement les écoulements de surface).

III°, D - 3 - Zones d'infiltration.

Au cours de l'inventaire des sources, on notera la présence de zones d'infiltration et de stagnation, leur position, leur superficie totale par rapport à celle de l'ensemble du glissement.

Les zones sensibles sont les replats, les dépressions, les secteurs à grande densité et à maille serrée de crevasses, les lentilles de gravier de sable.

Compte tenu de l'évaporation et de la rétention naturelle des sols, il est difficile de se faire une idée précise de l'infiltration active ; à cet égard, un système de case lysimétrique même rudimentaire implanté, par exemple, au niveau de zones fissurées peut apporter des renseignements intéressants.

III°, D - 4 - Eau souterraine.

Tout niveau perméable susceptible de renfermer une nappe doit être contrôlé par piézomètres. Des mesures fréquentes conduiront à l'élaboration de cartes de battement maximum et moyen de nappe ; les secteurs en charge

seront repérés. Les variations de niveau peuvent d'ailleurs être corrélées avec les déplacements topographiques et de profondeur fixant ainsi l'influence exacte de la nappe sur les masses instables. Les différentes caractéristiques hydrogéologiques guideront en outre le choix des ouvrages de correction et de prévention : puits de décompression, puits drainants, tranchées, station de pompage.

III°, D - 5 - Interventions humaines.

Mention sera faite des ouvrages de drainage, de transport et de stockage d'eau traversant le glissement et dont les fuites toujours possibles sont susceptibles d'être la cause des mouvements sinon d'avancer l'échéance de la rupture.

Toutes ces données hydrogéologiques donneront lieu à des cartes de géométrie des circulations d'eau superficielle et profonde.

III°, E - CINEMATIQUE DU GLISSEMENT.

Le terme cinématique recouvre ici tout ce qui a trait à l'aspect quantitatif du mouvement d'une masse de terre donnée : déplacements horizontaux, verticaux, vitesses, accélérations, bilan des terres érodées. Tous les spécialistes de l'étude et du contrôle des mouvements de terrain, sont unanimes à reconnaître que la surveillance des déplacements alliés à de bons levés topographiques (coupes, levés clinométriques) représente le seul moyen valable de contrôler l'évolution des versants. Pour notre part, nous sommes persuadés qu'il sera possible, dès que les études statistiques seront assez nombreuses, de prévoir le proche avenir d'un versant en équilibre instable en fonction de son profil, de sa pente et des courbes déplacement - temps. Des essais ont déjà été réalisés au Japon sur des glissements expérimentaux et ont permis de déterminer d'une façon approximative la période de rupture finale et totale.

Nous insisterons donc un peu plus longtemps sur cette phase de l'étude des glissements en faisant d'abord un tour d'horizon rapide des appareillages et méthodes employées et des interprétations que l'on peut raisonnablement avancer à partir des résultats obtenus (1).

III°, E - 1 - Introduction.

Un observateur même peu au fait des problèmes posés par l'étude des glissements peut aisément repérer dans de nombreux cas, des déplacements de terrain. Les arbres recourbés, les clôtures éventrées, les caniveaux, murs, chemins décalés, sont d'excellents indicateurs de mouvements qu'il ne faut d'ailleurs pas négliger lors d'une étude rigoureuse car ils sont susceptibles de fournir des renseignements précieux sur les déplacements totaux pendant une période donnée et peuvent aider au choix des implantations futures de témoins. De la même façon, les fissures, crevasses, bourrelets que l'on peut voir se former à la surface du sol sont aussi autant d'indices de mouvements à prendre en compte.

Mais ces observations courantes sont beaucoup trop approximatives et ne doivent constituer en aucun cas le seul moyen de contrôle mis en œuvre pour l'étude d'un glissement. Il est difficile, en effet, de distinguer à l'œil nu des mouvements très lents du style reptation (en dehors de toute observation de petits bourrelets) sans l'aide d'appareil de mesure ; en outre, même pour des déplacements importants, l'œil humain ne saurait apprécier l'évolution exacte d'un repère en fonction du temps.

III°, E - 2 - But de l'auscultation d'un versant.

Les mesures de déformation d'un versant remplissent trois rôles principaux.

a) Elles revêtent d'abord un caractère préventif pour l'ingénieur chargé de l'implantation d'un ouvrage quelconque sur une pente donnée. Elles permettent en effet, en tout premier lieu, de détecter les zones d'instabilité dans des régions jusqu'alors présumées stables ; certains déboires auraient pu être évités en effectuant quelques mesures seulement de surface ; mesures dont le prix de revient aurait été négligeable en regard des résultats financiers

(1) - Il existe de nombreuses méthodes et une grande diversité d'appareillages tous plus ou moins basés sur le même principe, nous ne parlerons que des principaux types d'usage courant. Des recherches plus poussées dans ces domaines sont actuellement en cours, au laboratoire de Géologie et à l'Institut de Géotechnique de Grenoble.

désastreux de certaines opérations de correction.

- Elles permettent aussi de faire des pronostics sur les périodes éventuelles d'activation ou de réactivation d'un glissement ancien, prévisions s'avérant nécessaires à la bonne exploitation de voies de communication par exemple. C'est ainsi que la S.N.C.F. astreinte à des normes de sécurité très strictes contrôle sérieusement les zones douteuses traversées par les voies ferrées. L'E.D.F. suit aussi avec attention l'influence de la mise en eau d'un barrage sur les berges de la retenue. Toutefois cet état d'esprit est loin d'être adopté systématiquement, du moins en France ; les techniques et les méthodes ont cependant évolué et il est possible à l'heure actuelle de déceler des déplacements très petits.

b) Dans le cas de glissement actif, l'auscultation du versant joue le rôle de contrôle.

- Elle fournit des renseignements quantitatifs sur l'évolution des mouvements horizontaux, verticaux, sur les vitesses, les directions de mouvements qui permettront en première approximation de déterminer les zones actives, calmes, celles dangereuses et celles à évolution catastrophique.

- Un contrôle rigoureux met en évidence les périodes d'accélération des vitesses, il constitue même le seul moyen de prévision d'une rupture finale.

- Elle oriente le choix des mesures de correction en fonction des caractéristiques du mouvement et permet d'en contrôler l'efficacité, ce dernier point étant souvent délaissé à tort dans les études de glissement.

c) Enfin les mesures de déformation ont un caractère spéculatif en fournissant une somme de renseignements sur :

- les mécanismes de glissement ;
- les relations entre déplacement et géométrie du sous-sol ;
- l'équilibre des masses de terre en fonction des différentes roches et formes de relief ;
- le bilan d'accumulation ou de dénudation d'un versant ;
- les relations avec les facteurs climatiques et hydrogéologiques ;
- la viscosité des terres en mouvement.

III°, E - 3 - Méthodes de mesures et appareillages.

Il existe deux grandes méthodes d'auscultation des versants :

- l'auscultation de surface et de subsurface ;
- le contrôle des déformations en profondeur.

III°, E - 3-1 - L'auscultation de surface et de subsurface.

Nous grouperons dans ce paragraphe tout ce qui a trait aux méthodes fondées sur les mesures de déplacements relatifs de repères topographiques par rapport à des points fixes ou peu mobiles.

Parmi celles-ci, la méthode classique utilisant les appareils de topographie courants tels que les théodolites et niveaux est la plus connue et se révèle très efficace si elle est employée à bon escient et avec rigueur. Avec la précision des théodolites actuels, il est en effet possible de déterminer assez facilement des variations de longueur de 2 à 3 mm suivant les appareils et suivant les distances de visée.

Mais devant la longueur des opérations, le prix de revient assez élevé de plusieurs campagnes de mesures et les risques d'erreur (surtout si l'on a affaire à des déplacements lents avec des distances de visées importantes), un certain nombre d'appareils ont été mis au point pour mesurer des distances avec la meilleure précision possible depuis les télémètres, les émetteurs infra-rouge jusqu'au laser. On obtient ainsi en toute sécurité suivant les types d'appareil et les méthodes, les 1 ou 2 mm à 1000 m. Le principe général est toujours le même, un émetteur envoie un mince rayon lumineux (lumière visible, infra-rouge, cohérente) sur des balises ou des prismes spéciaux qui renvoient le faisceau sur un récepteur. La comparaison entre la fréquence émise et celle reçue permet d'apprécier la longueur du trajet parcouru par la lumière. Certains de ces appareils sont d'un encombrement minimum et peuvent fonctionner sur batterie et se fixer sur des pieds de théodolite. Ils ne fournissent en général que des mesures de distance, ce qui nécessite un travail supplémentaire de résolution des côtés de triangle et l'implantation de plusieurs bases fixes afin d'avoir de fréquentes intersections de visée.

- Une troisième voie est celle de la photogrammétrie employée avec succès pour l'étude des mouvements de glacier et qui tend à se développer de plus en plus. Comme ceux cités plus haut, ces appareils raccourcissent la durée des opérations de terrain d'au moins 50 % dans certains cas. La méthode photogrammétrique est très employée au Japon semble-t-il où de fréquentes prises de vue (terrestre ou aérienne) permettent des comparaisons de plans à différentes périodes du glissement. (1)

- On peut envisager encore, devant le manque de moyens financiers, de faire des prises de vues terrestres ordinaires à intervalle régulier ; il doit être possible, à priori, de comparer différents clichés représentant des alignements de piquets et de noter par superposition des déplacements. Toutefois, il sera impossible d'assurer une bonne précision et on sera limité du point de vue domaine d'emploi (seuls les déplacements importants pourront être perçus). En outre, cela suppose quelques sujétions techniques telles que : appareil de prise de vues de très bonne qualité, dispositif de centrage excellent (de manière à avoir toujours le même angle de prise de vues sur la verticale, pouvoir important de résolution des objectifs et un terrain découvert. Néanmoins ce système reste très abordable au point de vue coût et peut faire la preuve de l'instabilité d'un versant.

- Dans le domaine de la solifluxion et de la reptation, P.J. WILLIAMS (1957) a expérimenté en Norvège et en Suède des sondes d'auscultations de mouvements lents dans les sols soumis à une solifluxion de type périglaciaire. Cette sonde est constituée d'une lame d'acier de 1 à 2 m de longueur, de 1 mm d'épaisseur et de 2 cm de largeur ayant un module d'élasticité donné.

Elle porte à intervalle régulier des jauges de déformation constituées d'un fil dont la résistance a été préalablement déterminée ; ces jauges sont en général disposées par paire de chaque côté de la lame d'acier.

Les déformations instaurées à la surface de la lame sont proportionnelles à la flexion selon la formule :

$$e = \frac{4}{L^2} dh$$

où h = épaisseur de la lame

d = flexion au milieu de la longueur L.

Ainsi une très petite courbure d'une lame de 1 m de long et de 1 mm d'épaisseur avec une flexion de 1 mm se traduit par une déformation d'environ 4 "microstrains" (1 "microstrain" équivaut à une déformation de 10⁻⁶ correspondant à une variation de résistance approchant le plus petit domaine mesurable). Des courbures très petites ne peuvent donc être décelées (fig. 66-67).

Ce système nécessite un appareillage réduit et courant, jauges de déformation, batterie, pont de Weaston, les sondes sont placées dans des sondages exécutés à la tarière. La déformation étant transmise par les jauges, il est nécessaire d'en prévoir 2 à 3 paires par mètre de sonde. Toutefois, elles ne donnent pas la déformée approchée de la lame d'acier et ne peuvent figurer le profil des vitesses verticales. P.J. WILLIAMS a observé et contrôlé ainsi un bourrelet de solifluxion situé à l'aval d'un névé tardif en Norvège (Dovrefjell) ; deux sondes ont enregistré des mouvements de solifluxion, trois autres indiquent des petits mouvements, les deux dernières montrent un terrain relativement stable. Pour une période de 4 semaines, les 15 paires de jauges électriques collées sur les 5 sondes ont donné les résultats suivants :

- 7 paires de jauges indiquent un déplacement correspondant à 78 "microstrains" soit une courbure de 20 mm au centre de la sonde en acier de 1 m de long et de 1 mm d'épaisseur.
- 7 autres paires de jauges indiquent un déplacement correspondant à 35 "microstrains" soit une courbure de 9 mm.
- 1 paire de jauges seulement donne une variation de résistance du même ordre que 150 "microstrains", soit une courbure de 38 mm.

En conclusion une campagne de surveillance dépend beaucoup du site à surveiller, il est évident que la précision requise pour l'auscultation d'une coulée active ne serait être du même ordre que celle exigée par l'étude des rives d'un barrage ou de pentes soumises à la reptation ou encore de glissements au stade de la phase préparatoire.

(1) - Des chambres métriques sont utilisées actuellement par l'I.G.N. pour l'auscultation des barrages et permettent après restitution de déceler des déplacements de l'ordre du millimètre.

Il existe deux méthodes principales d'usage courant :

- La triangulation.
- Le rayonnement.

a) La triangulation.

Ce procédé couramment utilisé en géodésie peut être employé avec bénéfice dans le cadre de l'auscultation d'un versant. Il est fondé essentiellement sur les recouvrements et intersections de visées sur des repères topographiques de tous ordres. Plusieurs variantes sont employées.

- Il est possible d'implanter à coup sûr, une base topographique fixe peu éloignée de la zone à surveiller. On part alors de cette base (soigneusement relevée et nivelée) pour relever et intersecter des repères de déplacement disséminés dans le versant. Chaque point doit recevoir au moins trois ou de préférence quatre visées de manière à éviter le plus possible les erreurs et incertitudes sur les mesures d'angle et les opérations de report. Il est donc possible grâce à des mesures d'angle soigneuses et rapides à effectuer et grâce à des mesures de distance, de déterminer les mouvements horizontaux et verticaux des témoins.

Cette méthode comporte néanmoins quelques impératifs (quel que soit l'appareillage choisi).

- . Il faut être sûr de la stabilité de la base de départ et la vérifier de temps à autre (une fois sur deux) afin d'apporter les corrections nécessaires.
- . Les mesures d'angle doivent être fines, ce qui nécessite un centrage excellent des appareils.
- . Les mesures de distance doivent être les plus précises possible.
- . Les visées seront courtes.
- . En terrain à couvert végétal abondant (arbres, taillis), il est nécessaire de tracer des layons de visée.

- Il n'est pas possible d'implanter, à coup sûr, une base de départ la plus stable possible.

On se sert alors d'un réseau de triangulation rattaché par visées plus ou moins lointaines sur des repères topographiques bien visibles (clochers) ou sur des repères de nivellement connus (ponts, voies ferrées). Il suffit dès lors de posséder, près de la zone en mouvement, deux ou trois points, même mobiles, remplissant ces conditions de visée et de leur rattacher tout un réseau de témoins de déplacement implanté dans le glissement. On ne cherche pas à déterminer la position absolue des repères comme en géodésie mais seulement leur déplacement relatif.

Ce système est très employé pour la surveillance de berges de rivière, de retenue de barrage. Les témoins de la rive droite de la retenue de Génissiat à Léaz (Ain) sont triangulés à partir de trois points de départ situés en rive gauche (dans le cas précis de Léaz, les points de départ pouvaient être considérés raisonnablement comme fixes). Les services de l'E.D.F. se servent d'un réseau de triangulation locale implanté des deux côtés d'une vallée, pour ausculter leurs rives de retenue ; les mesures portent sur les variations de distance entre deux repères, soient longitudinaux du même côté de la vallée, soient transversaux. Des calculs sur machine électronique ont montré que l'erreur quadratique moyenne était pour le site de Bort les Orgues de 2,6 mm sur les longueurs transversales à la vallée et de 0,7 mm sur les distances longitudinales (875 m). Dans les études courantes de mouvements de terrain, une telle précision n'est pas toujours requise.

La méthode de la triangulation peut donc être employée avec bénéfice pour les études de berges de retenue, pour l'auscultation des versants soumis à la reptation et pour des glissements très localisés et en terrain découvert. Elle sera pratiquement obligatoire dans certains cas, soit pour des raisons financières (le nombre de témoins étant alors beaucoup moins grand) soit pour des raisons de difficulté d'accès (en particulier quand le terrain est très boisé).

b) Le rayonnement.

Cette méthode est la plus classique, elle fait appel aussi à des notions de triangulation. Elle consiste à mesurer le déplacement de lignes de piquets, rectilignes, transversales ou longitudinales au glissement. Ces lignes doivent avoir à leurs extrémités des stations fixes pouvant se raccorder à une base topographique de départ.

Au cours de chaque série de mesures, on effectue un nivellement de précision, des mesures d'angles horizontaux et des mesures de distances. Pour ce faire, on se place sur une des stations fixes et on vise directement les différents points mobiles de l'alignement, en notant les différences angulaires entre la position initiale (visée sur l'autre base fixe) et celle du relevé, et les nouvelles longueurs, ce qui permet d'obtenir les déplacements relatifs dans toutes les directions.

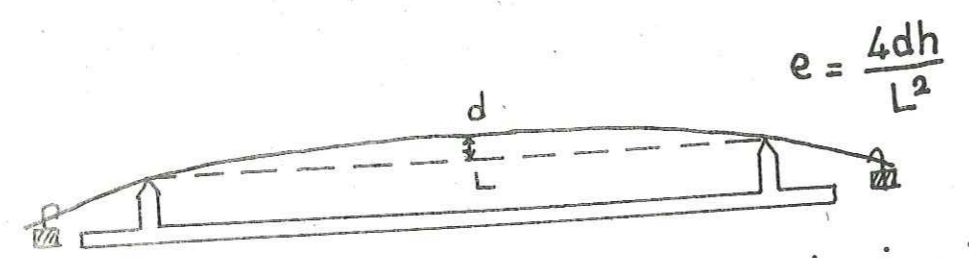
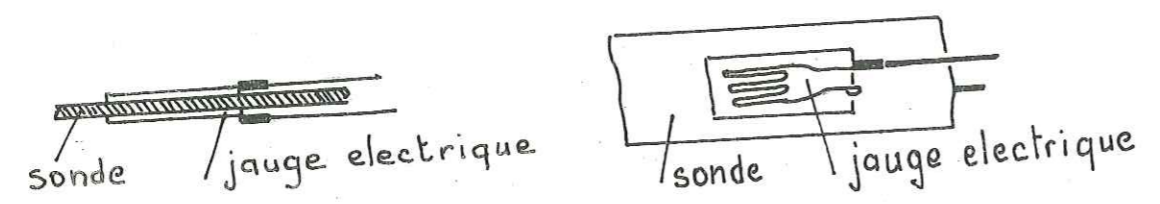


Fig.66 abc Sonde de solifluxion(WILLIAMS)

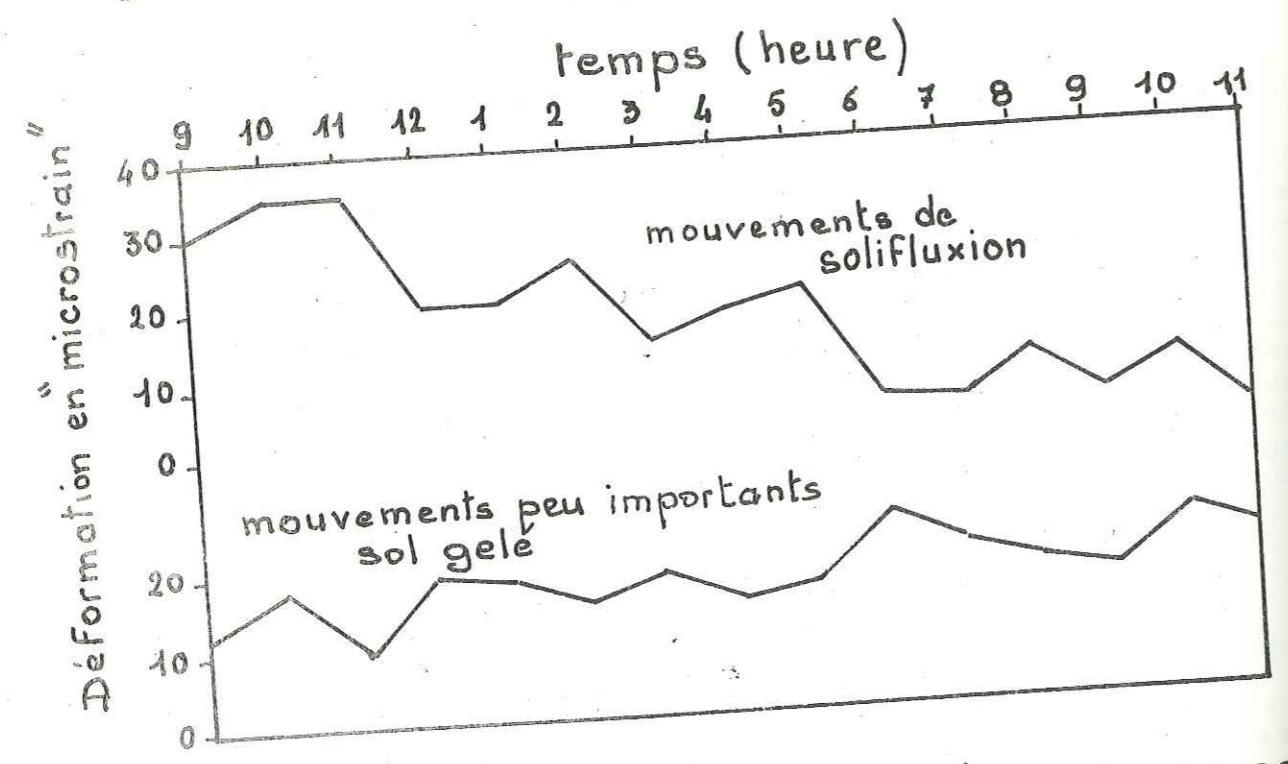


Fig.67 Enregistrement donné par une sonde équipée de deux paires de jauges.

c) Variante du rayonnement.

Certains impératifs géologiques et topographiques peuvent entraver la disposition régulière et rectiligne des alignements, notamment dans le cas d'indices de stabilité peu réguliers et disséminés sans ordre le long d'un versant. On part encore d'une station fixe et on effectue un cheminement de témoins à témoins (un coup avant et un coup arrière), en visant au gré des possibilités, des points fixes et connus implantés de l'autre côté d'une vallée par exemple. Cette méthode a été employée pour la surveillance du versant rive gauche de l'Arc au-dessus de Modane où quelques uns des 150 témoins pouvaient être rattachés sur le fort, situé en rive droite.

d) Conclusions.

Quelle que soit la méthode choisie en fonction de l'importance de l'étude, il est impératif de faire un bon nivellement, des mesures de distances les plus précises possibles et de vérifier les mesures angulaires en répétant deux fois les mêmes visées. Nous insistons sur le fait qu'un témoin ne se déplace pas forcément dans une direction parallèle à la ligne de plus grande pente ; les déplacements doivent donc être mesurés selon les directions de mouvement propre à chaque témoin.

En outre, il est important que les mesures soient toujours faites par le même opérateur, avec le même type d'appareil, et à intervalles de temps réguliers.

III°, E - 3-1-3 - Implantation des repères topographiques.

Le point délicat réside dans le choix des stations de départ des alignements ou des opérations de triangulation. S'il y a doute, il est nécessaire de vérifier régulièrement cette base de départ pour apporter des corrections ou alors adopter un système de lever souple.

a) Nature des repères.

Les repères peuvent être de différentes natures.

- Certains ouvrages peuvent servir de témoins de déplacement, mur, gabion, pylône, glissière de route, conduite, voie ferrée, chemin ;
- Les fissures et les crevasses sont aussi des repères utiles à surveiller, les variations de distances entre deux piquets de bois situés de part et d'autre de la fissure permettent d'avoir des renseignements sur l'évolution probable du glissement. Les Japonais utilisent fréquemment des appareils simples : les "strain meters" pour calculer les déplacements relatifs des bords d'une crevasse ou de la niche d'arrachement principale, ce qui leur permet de déterminer le début de l'état instable, la vitesse de déformation commençante et le temps de rupture par "fluage". Ces données mises en parallèles avec des mesures de laboratoire (essais sur des matériaux divers : sols, métaux etc...) peuvent fournir une idée sur le moment de la rupture finale.

- Dans le cadre d'une auscultation normale de surface, les formules les meilleures sont les suivantes :

+ un système bon marché et efficace consiste en un tube métallique (type jalon de topographe ou autre) enfoncé dans le sol à 1 m 50 - 2 m de profondeur, gainé de béton d'une façon continue ou discontinue (dans ce dernier cas un bloc de béton à la base et à la tête du tube suffit, le reste de l'espace annulaire étant rempli de sable). Le tube dépasse légèrement au-dessus de la surface du sol et doit pouvoir recevoir un deuxième jalon qui servira de repère pour les différentes mesures. Ce système a le mérite d'être peu coûteux, facile à mettre en œuvre et de donner des mesures d'inclinaison. Ce type de témoin fournit une bonne image des mouvements dans les cinq premiers mètres (fig. 68 a).

+ dans le cas de sols gonflants, on emploie alors des tubes en acier, munis à leur base de petites semelles en béton (fig. 68 d) qui permettent en plus d'avoir une idée sur les effets du gel.

+ on peut employer aussi ce qu'on appelle des témoins de profondeur, constitués d'un pilier de béton, similaires à ceux utilisés pour mouvements plus profonds. Ils sont disposés en éventail et permettant de tester des mouvements plus profonds.

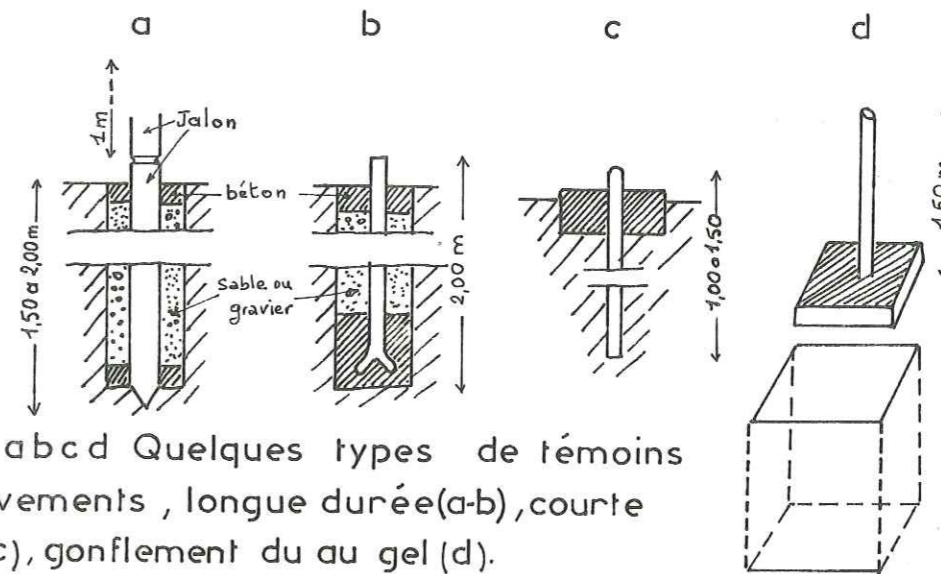
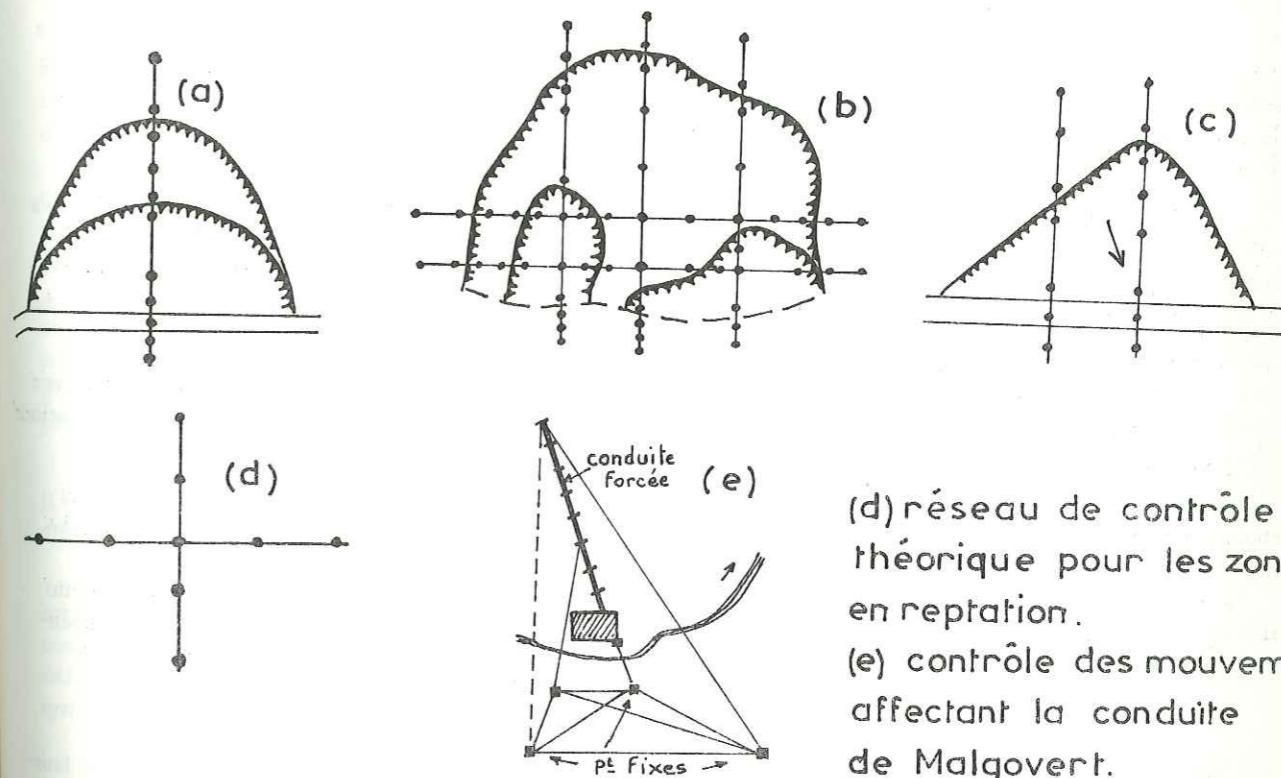


Fig. 68 a b c d Quelques types de témoins de mouvements, longue durée (a-b), courte durée (c), gonflement du au gel (d).



(d) réseau de contrôle théorique pour les zones en reptation.
(e) contrôle des mouvements affectant la conduite de Malgovert.

Fig. 69 a b c d e Différents types d'implantation de réseau de contrôle topographique.

b) Disposition des repères.

Plusieurs méthodes peuvent être envisagées suivant des critères topographiques, géologiques et financiers. Une des plus connues est celle des alignements transversaux par rapport à la direction de mouvement. On implante une série de lignes parallèles de témoins espacés régulièrement, l'intervalle entre chaque témoin étant fixé arbitrairement en fonction de la largeur du glissement. Il est indispensable que ces lignes débordent largement sur la zone non active, non seulement pour le choix des stations de départ, mais encore pour le calcul des déplacements relatifs entre les deux zones.

Cette méthode est commode et représentative dans le cas de surveillance de coulée, de glissement à limites nettes, de solifluxion localisée. On peut choisir, par exemple, d'implanter une première ligne transversale au niveau de l'arrachement principal, une autre vers le milieu de la coulée et une dernière dans la zone des bourrelets. Cette méthode est appliquée actuellement pour le contrôle du glissement de Léaz ; (fig. 86).

Souvent des zones d'arrachement secondaires s'ajoutent à l'escarpement principal ; c'est le cas en particulier de petits glissements localisés à l'intérieur d'un ancien glissement. Il est nécessaire alors de combiner des lignes transversales avec des lignes longitudinales qui donneront les déplacements de chaque partie du versant et permettront de distinguer le coefficient d'activité de chaque zone : glissement frais, glissement ancien. De plus ce système permet de suivre l'évolution de l'érosion régressive, les mouvements rétrogradés.

L'espacement des témoins est alors quelconque et irrégulier, il est nécessaire en effet de recouper le maximum de formes et d'indices de glissement, chaque bord d'arrachement important doit être piqueté de façon à faciliter la comparaison entre les différents secteurs en mouvement (fig. 69 a b c d).

Dans certains cas, la zone en mouvement n'est pas nettement délimitée, on n'observe alors que des formes sans continuité apparente et sans disposition régulière : coupures dans un chemin, rupture de pente, replat anormal, arrachement latéral, petite coulée superficielle. Il est intéressant, à ce moment-là, de placer des témoins de chaque côté de l'indice en question, afin de suivre son évolution propre et de l'intégrer par la suite à l'ensemble de la zone par l'intermédiaire d'une triangulation quelconque. Il est possible alors de classer les différents secteurs du versant suivant leur degré d'activité. Trois alignements irréguliers avaient été implantés dans ce but, en novembre 1966, dans le versant de Modane en rive gauche de l'Arc.

Si on a choisi la méthode de la triangulation mettant en jeu un nombre plus restreint de témoins, il n'y a pas d'impératif absolu quant à leur disposition à l'intérieur du glissement. On peut les disposer suivant un schéma triangulaire, rectangulaire ou en croix en ayant toutefois toujours le même souci de recouper les indices de glissement les plus importants. De telles dispositions sont très valables pour des études de versant en reptation, ou pour des surveillances de talus (fig. 69 e).

Si l'étude nécessite un certain nombre de sondages équipés en piézomètres, il est bon de les coupler avec des repères de déplacement (même de surface) en vue de corrélations éventuelles des déplacements avec les variations de niveau piézométrique.

En conclusion : chaque glissement étant un cas d'espèce, on s'efforcera d'adapter au mieux une ou plusieurs méthodes selon les impératifs géologiques, topographiques et financiers de l'étude ; il peut être utile parfois d'implanter un alignement à titre d'essai et d'étalonnage, puis ensuite, de choisir un schéma définitif de contrôle.

Parmi les repères, il est nécessaire d'en prévoir de différentes sortes, témoins de surface (1 à 2 m) et témoins de subsurface (2 à 5 m). Quant au nombre, il est choisi en fonction de l'étendue du glissement, mais il doit cependant être suffisamment grand pour pouvoir donner la meilleure image possible de l'ensemble des déplacements.

III°, E - 3-2 - Le contrôle de profondeur.

L'auscultation de surface ne donne qu'une image approximative des mouvements qui, de plus, est souvent faussée par l'apparition de phénomènes superficiels comme les langues de boue peu épaisses libérées à la faveur de crevasses et qui peuvent, de la sorte, provoquer des déplacements anormaux. De plus, la méthode topographique ne peut, à elle seule, fournir une image probable des déformations en profondeur.

Le contrôle profond des déformations s'impose donc, malgré son prix de revient assez élevé (du moins dans l'état actuel des techniques) et constitue le seul moyen

- de repérer des zones de faiblesses profondes ;

- de tester la stabilité d'un volume donné de mauvais terrain (naturel ou rapporté) ;
- de connaître la façon dont le matériau se déforme en profondeur, à quelle vitesse et avec quelle intensité.

III°, E - 3-2-1 - Les appareils.

Là encore, dans ce domaine, il existe de nombreux appareils différents, tous plus ou moins protégés par brevet. Nous ne parlerons que ceux d'usage courant.

a) Le système le plus simple est celui du contrôle de la forme prise par un "tube en plastique". Il représente à l'heure actuelle ce qu'il y a de meilleur marché et de plus facile à mettre en œuvre. Le principe en est simple ; il consiste, la plupart du temps, à faire passer dans un tube plastique de diamètre donné, soit une série de calibre plus ou moins long, soit à un stade plus élaboré, des appareils appelés inclinomètres dont nous reparlerons dans le paragraphe suivant.

Ce procédé s'adapte à différents diamètres de sondages de reconnaissance depuis 7 pouces jusqu'à 60 mm. Les tubes plastiques (polyéthylène) sont maintenus en tension à l'aide de tige de sondage pendant le remplissage de l'espace annulaire (tube plastique - paroi du sondage) par du sable fin sec.

Des calibres de différentes longueurs et de différents diamètres sont descendus librement (sans forcer) dans le tube à l'aide d'un câble gradué et on note les profondeurs auxquelles ils se bloquent. Il est recommandé de maintenir le tube rigide dans les 2 ou 3 premiers mètres sous la surface, afin de le soustraire aux déformations violentes de surface qui risqueraient de le rendre rapidement inutilisable.

Ce système permet de dire qu'il y a déformation autour d'une cote donnée, mais ne fournit aucun renseignement sur la forme du tube (déformation continue concave ou convexe - rupture en un point indiquant une translation) ni sur le déplacement, ni sur la direction de mouvement. De plus, leur rentabilité s'avère très limitée dans le temps, car une fois coulé par des déformations importantes, le tube ne peut plus être contrôlé d'une façon efficace. On pourra seulement avancer que tel ou tel tube s'est plus ou moins déformé selon que, un ou deux ou plusieurs calibres se bloqueront (voir tableau n°42). Cette technique a été employée dans le glissement de Léaz (Ain), avec une série de trois calibres respectivement de longueur 2 m, 1 m, 0,5 m.

Dans le cas où la déformation importante se situe près de la surface, on peut améliorer la méthode en enfonçant une barre de fer dans le tube, qui permettra de savoir d'une façon approximative si le tube s'est déplacé selon un mouvement superficiel (barre de fer inclinée vers l'avant) ou si au contraire il y a un mouvement de translation profond (barre de fer inclinée vers l'arrière).

En conclusion, les tubes de déformation en plastique testés par passage de calibre de différentes tailles sont excellents pour détecter rapidement une ou au plus deux surfaces de glissement. Leur domaine d'emploi est optimum pour le contrôle de la stabilité des remblais (voies ferrées, routes etc...), mais dans le cas de glissement de plus grande amplitude ou de mouvements complexes, les tubes deviennent rapidement inexploitable et leur précision est par trop aléatoire.

b) Les inclinomètres. Ces appareils sont utilisés depuis longtemps pour la mesure des déviations de sondage ; il en existe différents types depuis l'inclinomètre chimique, optique, jusqu'à ceux réservés plus spécialement aux études de stabilité, qui peuvent se classer en deux catégories.

- Les inclinomètres mécaniques à résistance, composés essentiellement d'un tube court (50 à 60 cm de long) contenant un pendule couplé à une résistance variant en fonction de l'inclinaison du forage. Ces appareils coulisent en général dans des tubes spéciaux rainurés en croix ; certains d'entre eux peuvent cependant tester les déformations de tubes plastiques lisses et en donner la forme exacte ; les japonais emploient couramment ce dernier système.

- Les inclinomètres à cordes vibrantes (procédés Telemac), l'organe essentiel se compose d'une tige calibrée portant un poids à la manière d'un pendule et encastrée à sa partie supérieure dans un tube enveloppe en métal. Les variations d'inclinaison engendrent une flexion de la tige qui est mesurée suivant deux directions rectangulaires à l'aide de quatre cordes vibrantes ; cette partie sensible est protégée par un tube en bronze de diamètre maximum de 68 mm, parfaitement étanche et pourvu de roulettes de guidage permettant le coulisage dans des tubes spéciaux à rainures.

Les valeurs de pente sont calculées par l'intermédiaire d'unités électriques ou acoustiques selon les cas.

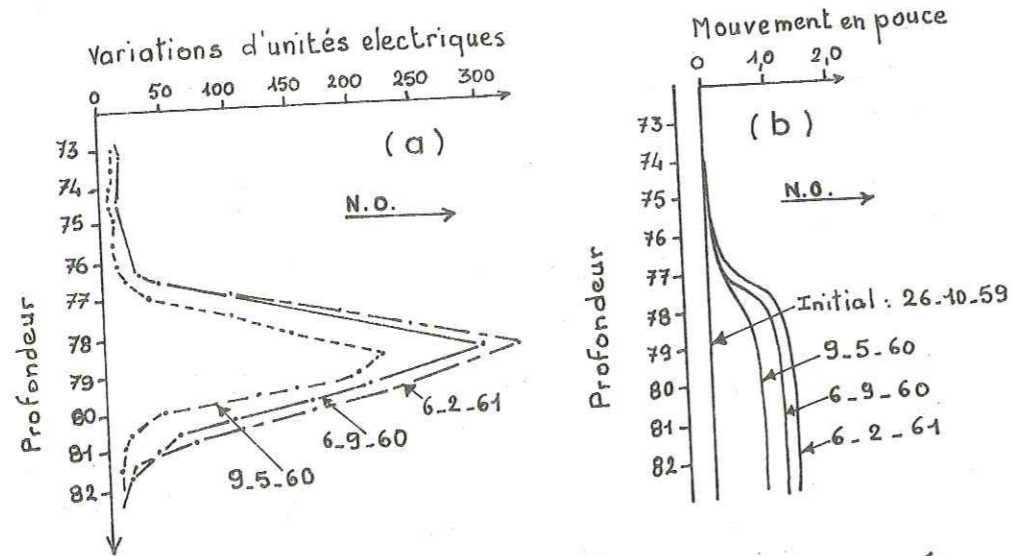


Fig. 70ab Données fournies par les inclinomètres à résistance

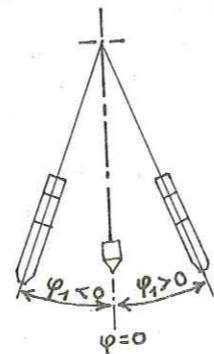
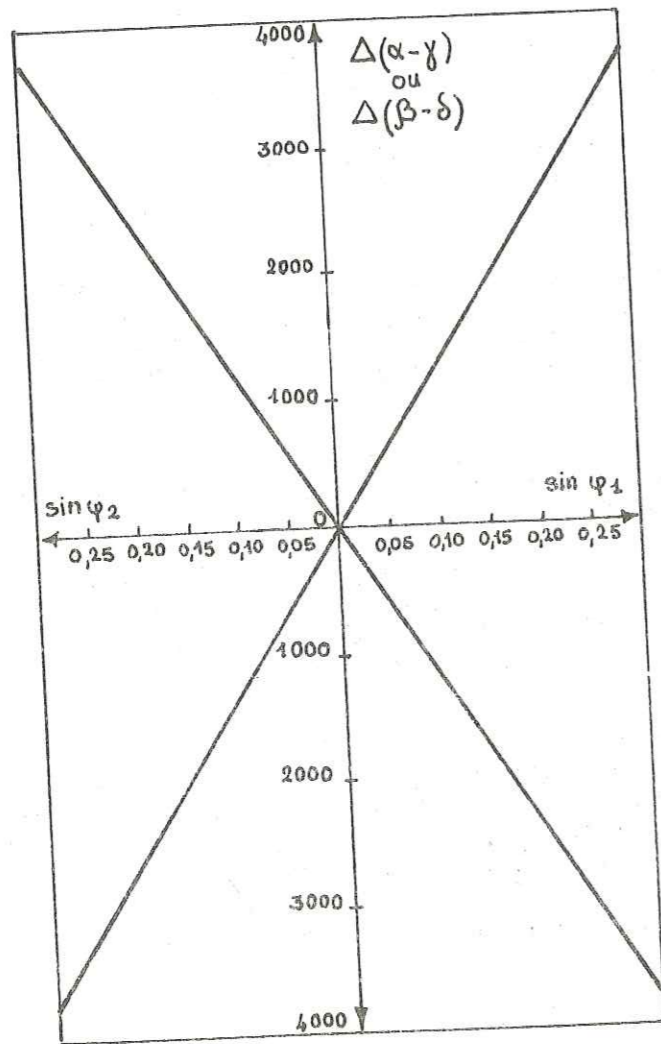


Fig. 71 Courbe d'étalonnage TELEMAC

1^o courbe : mesure sur cordes 1 et 3
 $\Delta(\alpha-\gamma) = (\alpha-\gamma) - (\alpha_0-\gamma_0)$
 2^o courbe mesure sur cordes 2 et 4
 $\Delta(\beta-\delta) = (\beta-\delta) - (\beta_0-\delta_0)$
 Pour $\varphi \approx 0$, $\sin \varphi = \Delta \times 83 \times 10^{-6}$

- + L'inclinomètre à résistance électrique du type "Slope Indicator" de S.D. WILSON fait intervenir des différences de valeurs de résistance qui, une fois transformées permettent de connaître la déformée du tube, les pentes et les déplacements (fig. 70).
- + L'inclinomètre acoustique Telemac fait intervenir des différences d'unité d'écoute entre deux couples de cordes vibrantes que l'on fait correspondre aux deux directions principales nord - sud ; ouest - est. Une différence de 10 unités au comparateur du poste d'écoute pour deux cordes opposées correspond à une variation de pente de 1/1000. Ces variations d'unité proportionnelles à sinus φ que l'on déduit de la courbe d'étalonnage Telemac (fig. 71).

Il y a deux façons de procéder au dépouillement.

On fait une mesure de verticalité qui servira une fois pour toute de mesure de zéro et ensuite de temps à autre des contrôles entre chaque campagne de mesures. Les lectures faites par la suite dans le tube permettent d'avoir la déformée exacte du sondage.

Le dépouillement peut se faire aussi par rapport à la lecture initiale faite dans le sondage ; on ignore alors la déformée exacte, mais on obtient les variations de pente.

L'étude des déformations en sondage requiert de la part des inclinomètres un certain nombre d'exigences :

- une grande sensibilité permettant l'obtention de variation de pente de 1/1000,
- un système de contrôle des azimuts ; soit les tubes spéciaux à rainures, soit une boussole avec dispositif photographique (analogue à la pendagimétrie),
- une bonne fidélité.
- un encombrement et un poids peu important permettant un transport facile,
- des dimensions adaptées au sondage de reconnaissance courant de petit diamètre.

Ces conditions requises, les inclinomètres présentent de nombreux avantages, dont l'un des plus importants est de permettre la connaissance des différents paramètres des mouvements profonds (formes, quantité de déplacement, localisation exacte des surfaces de glissement, direction de mouvement).

Toutefois, ces appareils sont souvent limités au point de vue mesures angulaires, la plupart d'entre eux, en effet, ne donnent que des variations de 15 à 20° sur la verticale. Dans le cas de mouvement brusque ou de grande intensité, le tube guide se coudera complètement et sera ensuite inutilisable (1).

III°, E - 4 - Fréquence des mesures.

La rentabilité et la validité des opérations de surveillance ne peuvent être assurées que si les diverses campagnes de mesures se déroulent d'une façon très régulière. Les levés sporadiques et peu nombreux ou incomplets sont absolument à proscrire car ils obligent à faire des extrapolations dangereuses et masquent, de ce fait, les variations de vitesses et leurs accélérations. Ainsi pour le glissement de Léaz, l'absence de mesures pendant 16 mois ne nous permet pas de déceler le véritable moment initial de reprise des mouvements importants. La fréquence de mesure dépend évidemment du site à surveiller, des conditions de pénétration et d'accès, et de la gravité du problème ; il est inutile en effet de faire des contrôles topographiques de surface tous les huit jours sur une pente en reptation ou pour des mouvements extrêmement lents, car on tombe alors dans le domaine d'incertitude des appareils.

III°, E - 4-1 - Fréquence des mesures de surface.

Nous pouvons formuler les conditions suivantes :

- Les mesures faites tous les six mois ou tous les ans, sont nettement insuffisantes dans la majeure partie des cas, à moins qu'il ne s'agisse de régions montagneuses très enneigées ou à pénétration très difficile ou encore de contrôle préliminaire de la stabilité d'un glissement ancien du type postglaciaire ou de pentes en reptation lente.
- Dans les cas d'évolution lente et de déplacements relativement peu importants de l'ordre des 1 à 2 cm, des mesures tous les trois mois peuvent suffire, mais il faut changer de fréquence dès qu'une accélération est décelée.

(1) - Néanmoins, il existe certainement, d'après les écrits japonais et américains, des inclinomètres permettant l'enregistrement de pentes plus fortes.

On combine d'ailleurs souvent, après une période préliminaire, la fréquence trois mois et une fréquence plus courte.

c) Une fréquence adaptable à la majorité des cas de mouvements de terrain en phase préparatoire ou de surveillance systématique des périodes d'activation, et celle mensuelle. Le glissement est donc suivi d'une façon plus serrée et cela permet d'adopter un nouveau planning de mesures plus fréquentes si besoin est (mesures tous les 15, 8, 1 jours).

d) Dans le cas de déplacements importants et de vitesses fortes ou si un élément extérieur risque d'avoir des conséquences importantes sur la stabilité d'un versant (variations importantes de plan d'eau par exemple) il est bon de resserrer dans le temps les mesures. Ainsi à Vajont Longarone, certains témoins étaient testés journallement. La même remarque s'applique au moment où la rupture est jugée proche (grande accélération des vitesses par rapport aux vitesses moyennes).

e) En outre, à la manière des stations russes d'étude de glissement, il est intéressant de faire des campagnes de mesures supplémentaires à la suite d'orages violents inhabituels, de secousses sismiques (même de petite amplitude) de crue catastrophique, d'avalanche surchargeant un ancien glissement, de vidange rapide ou de naissance d'autres glissements dans les environs du domaine d'étude.

f) Dès que des moyens de correction ou de prévention ont été mis en œuvre, la seule façon de vérifier précisément leur efficacité est encore le contrôle des mouvements. En particulier, tout drainage doit être contrôlé par des mesures journalières, puis hebdomadaires, puis mensuelles de quelques uns des témoins.

g) Le contrôle topographique doit couvrir la phase préparatoire du glissement, et pouvoir détecter aussi d'éventuelles répliques.

III°, E - 4-2 - Fréquence des mesures profondes.

Les inclinomètres permettent de tester de petites variations de pente, il importe donc de pouvoir suivre dans le détail les déformations des tubes, ce qui nécessite des contrôles très fréquents. A priori, la fréquence mensuelle est trop grande car on court le risque d'une rupture complète du tube entre deux séries de mesures éliminant ainsi toute possibilité de connaître l'évolution exacte des déformations, c'est-à-dire, depuis le moment initial des mouvements jusqu'à celui de la rupture.

D'une façon pratique on ne dépassera pas la fréquence hebdomadaire qui permettra de détecter des anomalies éventuelles dans la répartition des vitesses et de rapprocher un peu plus les mesures si besoin est (les japonais arrivaient ainsi avant les périodes de rupture à faire des mesures horaires).

Quant au nombre de points de mesure le long du tube, on peut prévoir dès les premiers contrôles de tester le tube tous les cinquante centimètres et ce, dans les deux directions rectangulaires, quitte par la suite à espacer les mesures dans les zones calmes et à les resserrer dans les endroits où il y a une déformation appréciable.

III°, E - 4-3 - Conclusions.

Le mieux serait évidemment de disposer d'enregistrements continus, mais ceci n'est guère possible pour le contrôle de surface si ce n'est pour les "strain meters" et les sondes de WILLIAM où des essais concluants ont été faits. Dans le domaine des mesures profondes par inclinomètre, nous savons qu'il existe des inclinomètres à enregistrement continu, cette méthode se pratique même à l'aide de plusieurs de ces appareils disposés le long du tube aux endroits où ont été décelées les déformations les plus importantes.

En pratique, on adoptera donc une fréquence de mesures en fonction de l'état du glissement, de son importance des possibilités d'accès, des facteurs climatiques et hydrauliques et aussi du type d'étude à effectuer. Ainsi si l'on veut vérifier la stabilité d'un versant sur lequel on peut avoir des doutes, on adoptera un système de surveillance assez souple au départ avec des mesures assez espacées dans le temps (3 mois, 6 mois) que l'on modifiera obligatoirement dès qu'un facteur extérieur interviendra : construction d'immeubles, de routes, exploitation de carrières etc...

Le point essentiel réside ensuite dans le respect de cette fréquence et dans un relevé complet des témoins ; il est très néfaste, en effet, d'effectuer certaines opérations sur quelques témoins puis d'autres différentes sur d'autres repères. Ceci n'empêche pas que l'on puisse, à l'intérieur d'un planning de contrôle, choisir quelques témoins à surveiller plus souvent en raison de leur situation (près de l'arrachement principal ou du bourrelet frontal) qui pourraient ainsi faire partie d'un dispositif d'alerte.

III°, E - 5 - Représentation des résultats.

III°, E - 5-1 - Report des mesures de surface.

a) Report des levés de terrain.

Dans le cadre d'un lever complet, on fera figurer, sous forme de tableaux de résultats, les principales données topographiques mesurées et calculées :

- le numéro du témoin, de l'alignement ;
- la date du lever ;
- les conditions atmosphériques à cette date ;
- la cote des témoins et leurs coordonnées absolues ou relatives s'il y a lieu (glissement de grande superficie) ;
- les déplacements horizontaux relatifs entre chaque mesure ;
- les déplacements horizontaux cumulés depuis l'origine ;
- les déplacements verticaux relatifs ;
- les déplacements verticaux cumulés depuis le temps t_0 ;
- les valeurs angulaires des vecteurs de mouvements (résultantes des déplacements horizontaux et verticaux) ;
- les directions de mouvements (angle) ;
- l'inclinaison prise par les témoins ;
- les directions de visée dans le cas de contrôle par triangulation ;
- les vitesses et accélérations ;
- les variations de distance entre deux repères voisins (dilatation ou contraction).
- les observations faites au cours du lever : naissance de fissures, écartement des lèvres d'une fissure, détournement de ruisseaux, apparition de sources.

b) Report des données annexes.

Ce sont essentiellement des données qu'il est possible de contrôler en fonction du temps ; rentrent dans ce groupe

- la pluviométrie et la nivométrie ;
- la température ;
- les débits ;
- les variations de niveau piézométrique ;
- les variations de plan d'eau libre ;
- la sismicité.

c) Report des différentes données sur diagrammes.

Les différents calculs peuvent donner lieu à un grand nombre de courbes et de diagrammes différents. Certains d'entre eux doivent figurer obligatoirement dans toute étude de glissement.

- courbes de déplacements horizontaux et verticaux en fonction du temps ;
- diagrammes de vitesses et accélérations en fonction du temps ;
- répartition en plan des déplacements horizontaux et des directions de mouvement ;
- report sur coupes des vecteurs de mouvement ;
- répartition des lignes d'égale vitesse ou d'égale déplacement ; dans le cas de versant très désorganisé, ces courbes seront remplacées par des secteurs d'égale vitesse ;
- histogrammes de fréquence relative et cumulée des déplacements horizontaux et verticaux.

Ces différentes courbes peuvent être corrélées avec des données météorologiques et hydrogéologiques du versant et du glissement.

III°, E - 5-2 - Report des mesures de déformation en profondeur.

On notera essentiellement les unités électriques ou acoustiques avec leurs équivalents en déformation et en valeurs angulaires, en fonction des directions et des profondeurs. Ces données peuvent être représentées de trois façons différentes :

- la déformée d'un tube plastique en fonction du temps (fig. 72 a) ;
- la déformation en fonction du temps pour un tube donné à des profondeurs données (fig. 72b)
- l'état du tube à des intervalles de cote réguliers en fonction du temps (fig. 72c).

III°, E - 6 - Interprétation des mesures de déformation.

Le manque d'études complètes et nombreuses de surveillance de glissement ne nous permettra pas de faire la critique des interprétations que l'on peut formuler à la lecture d'un tableau ou d'une courbe de déformation en fonction du temps. De plus, il faudrait pouvoir comparer entre eux les résultats obtenus sur différents types de mouvements en fonction de l'influence possible des principaux paramètres d'instabilité. Il est donc impossible ici d'essayer de formuler des lois générales régissant les déplacements de masses de terre ou de roches. Cependant, à partir de notre propre expérience portant sur le glissement de Léaz, nous essayerons de tirer quelques conclusions. Quelques faits retiendront plus spécialement notre attention.

III°, E - 6-1 - Quantité de mouvements ou de déformations.

Cette notion extrêmement importante est la base de toute étude ultérieure et répond à la question de savoir si le versant "bouge" ou non avec quelle intensité. En ce sens, les diagrammes de déplacement en fonction du temps constituent d'excellents indicateurs de stabilité et représentent l'évolution de la masse en mouvement. Cette évolution peut revêtir plusieurs formes.

a) Un accroissement continu des déplacements cumulés depuis le temps origine, en relation ou non avec une influence croissante d'un facteur instabilité (fig. 73 a).

De telles courbes représentent en général les mouvements qui régissent à long terme la phase préparatoire à la rupture. Elles donnent un aperçu des valeurs moyennes des déplacements et des vitesses de mouvement. Son élaboration nécessite des observations de longues durées qui fourniront matière à une statistique des déplacements en fonction du temps ; en particulier le rapport des mouvements d'année en année doit permettre l'établissement de sortes d'abaques traduisant les vitesses moyennes, minima, maxima pour une intensité d'action donnée d'un facteur quelconque d'instabilité (pluviométrie maximum, température minimum, cote de plan d'eau).

b) Après un tronçon croissant, la courbe peut s'aplatir (fig. 73 b).

Cette forme correspond à une stabilisation nette des mouvements que l'on vérifie une fois de plus sur une période assez longue. Les résultats transcrits sur un histogramme montreront une répartition importante du côté des petits déplacements. Cette stabilisation peut être l'indice de la cessation (temporaire ou permanente) des causes d'instabilité (arrêt du creusement d'une tranchée en pied de talus par exemple) ou de la mise en place et du bon fonctionnement de mesures de correction (galerie drainante rabattant une nappe).

c) Après un tronçon croissant ou un palier de stabilisation, il y a changement de pente brusque (vers les déplacements forts) de la courbe.

Les vitesses enregistrées dépassent de beaucoup les vitesses moyennes observées jusqu'alors. Ceci traduit indubitablement les prémices de la rupture à plus ou moins court terme et constitue alors un excellent système d'alerte, à condition toutefois que tous ou la plus grande partie des témoins réagissent de la même façon.

SAITO et UEZAWA (1961 et 1965) estiment qu'il est possible de prédire approximativement le moment où se produira la rupture par la mesure des déformations des talus. Se fondant sur les hypothèses de rupture par fluage développées par des auteurs comme S.S. VIALOV (1), M. GOLDSTEIN (2), S. MURYAMA (3), F.C. MONKMAN (4) ils ont cherché une relation entre la vitesse de déformation et le temps de rupture par fluage pour les sols, en comparant des essais de compression et des observations de terrain.

- (1) S.S. VIALOV et A.M. SKIBITSKY (1957) "Rheological processes in frozen soils and dense clays" Proc. 4th. Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. I, p. 120-124.
- (2) - M. GOLDSTEIN et G. TER-STEPANIAN (1957) "The long term strength of clays and depth creep of slopes" Proc. 4th. Int. Conf. Soil Mech. and Found. Eng. II, p. 311-314.
- (3) - S. MURYAMA et T. SHIBATA (1956) "On the rheological characteristics of clay" (en japonais), Trans. Japan Society of Civil Engineers, 40, p. 1-31.
- (4) - F.C. MONKMAN et N.J. GRANT (1956) "An empirical relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests, Proc. A.S.T.M. 56, p. 593-620.

TABEAU N° 37 - VITESSES ET DUREE DES MOUVEMENTS POUR QUELQUES GLISSEMENTS

LOCALISATION	TYPE	MATERIAUX	VOLUME m ³	DATE	DUREE	VITESSES	REMARQUES
GOLDAU (Suisse)	Glissement de roches	marnes - grès schistes	40 millions	12/9/1808	1 - 2 min.	vit. max. = 70 m/sec.	Pente des couches = 20° (conforme)
ESSERT-ROMAND (France)	-----	-----	-----	1881	-----	0,15 m/an en 1885	
ELM (Suisse)	Eroulement	schistes et grès	10 millions	11/9/1881	45-50 sec.	50 m/sec.	Versant très pentu.
VERNAY (Ugines) (France)		schistes et gneiss du Sapey	-----	20/3/1891	-----	50 cm/an	
LA CULLA à Foncouverte (bassin de l'Arc)	-----		-----	1892	-----	0,9 m/an à 1557 m d'altitude 18 m/an à la cote 884	Dé nivellement de 1000 m.
MONTAGNE DE LA TORTUE (Canada)	Eroulement et glissement	calcaires paléozoïques	30,5 millions	29/4/1903	100 sec.	-----	Pendage inverse de 50°
GROS VENTRE (U.S.A.)	Glissement de roches	schistes - grès calcaires	38 à 50 millions	23/6/1925	3 - 4 min.	-----	Pendage des couches = 18° à 21° conforme
EIDSFJORD (Norvège)	Slump peu épais	-----	100 000	10/4/1945	1 - 2 min.	10 à 20 m/sec.	
MERDERET à St-MICHEL (bassin de l'Arc)	Coulée	-----	-----	1950	10 à 30 cm/an		
NISSEDAL (Norvège)	"Slump"	argile	400	13/3/1953	3 min.	0,8 m/sec	
BESKYDEN (C.S.R.)	Glissement de roches	calcaire	20 000	-----	-----	10 à 20 cm/jour	Mouvement le long d'anc. plans de glissement
POINTE FERMIN (Californie U.S.A.)	Glissement de bloc et éroulement		-----	-----	-----	3 cm/semaine	
RIVIERE MADISON (Montana U.S.A.)	Glissement de roches	gneiss - schistes dolomies	29 millions	17/8/1959	2 - 3 min.	vitesse finale = 160 km/h	Pendage conforme secousse sismique
HANDLOVA (C.S.R.)	Glissement de roches	-----	25 millions	1960	-----	8 - 10 m/jour puis 1 m/jour	
ARCHAMPS (bassin de l'Arve)	Coulée	-----	-----	-----	-----	5 à 6 m/jour	
VIAJONT LONGARONE (Italie)	Glissement de roches	calcaires	300 millions	9/10/1963 vers 23 h		vitesse max = 50 km/h vitesse moy. phase de reptation = 1 mm/jour	Pendage conforme 30 à 40°

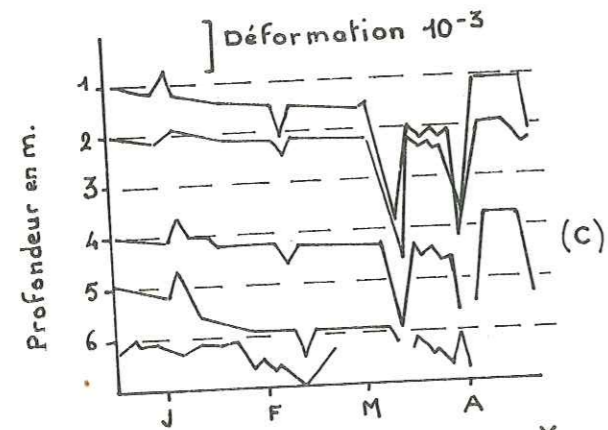
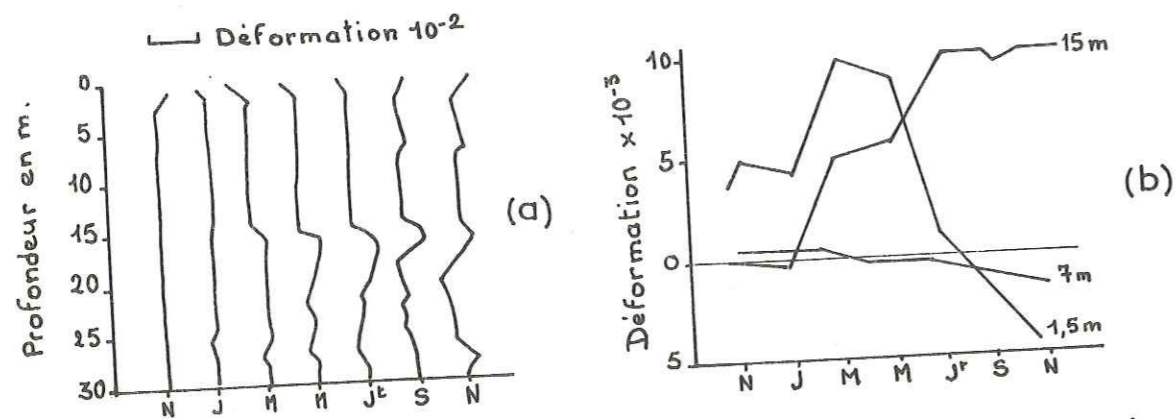


Fig. 72abc Représentations des données enregistrées par des inclinomètres. (a)(b) déformations importantes à 15m et 1,5m

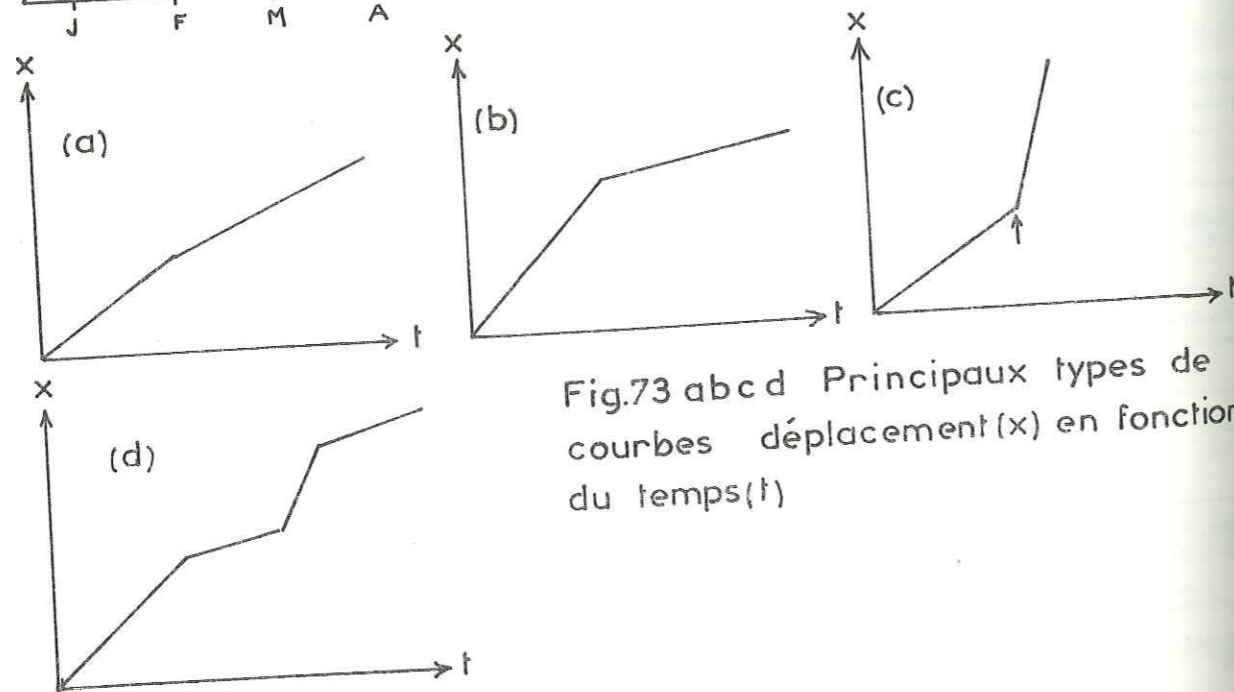


Fig. 73abcd Principaux types de courbes déplacement (x) en fonction du temps (t)

Cette relation a été mise en évidence sur diagramme bilogarithmique pour des essais en laboratoire effectués par différents chercheurs (fig. 74) ; en abscisse ont été portées les vitesses de déformation (strain-rate) en $10^{-4}/\text{min.}$ et en ordonnée, les temps de rupture par fluage en minute (creep-rupture life). Ceci se traduit par une droite d'équation :

$$\log t_r = C - \log \dot{\epsilon}$$

dans laquelle t_r = temps de rupture par fluage en minute.

$\dot{\epsilon}$ = vitesse de déformation en $10^{-4}/\text{min.}$

m et C = constantes

Pour les essais de SAITO cette équation devient :

$$\log_{10} t_r = 2,33 - 0,916 \log_{10} \dot{\epsilon} \pm 0,59$$

En supposant que la pente "m" de cette droite soit égale à 1 au lieu de 0,916 il est possible d'écrire à nouveau :

$$\log_{10} t_r = C - \log_{10}$$

$$\text{ou } t_r \cdot \dot{\epsilon} = \text{constante}$$

$$\text{et dans le cas présent : } t_r \cdot \dot{\epsilon} = 214.$$

Ce rapport indique que le temps de rupture par "fluage" est inversement proportionnel à la vitesse de déformation. SAITO et UEZAWA ont constaté que cette relation empirique s'appliquait à des observations en vraie grandeur pour des talus de route ; ils ont pu ainsi interrompre le trafic sur la route bordant la rivière Ooi au Japon, vingt quatre heures avant la rupture, d'après l'allure de la courbe des déformations construite à l'aide de mesures de déplacements (fig. 75 a b).

Cet essai est assez séduisant et peut ouvrir la voie à toute une série de lois axées sur la prévision de la rupture finale d'un glissement. Nous formulerons cependant quelques réserves : la relation de SAITO a une incidence régionale, les quelques essais ont été effectués au Japon sur des glissements limités et très localisés, du type "slump" dans un matériau que l'on peut considérer comme homogène : une argile à indice de plasticité bas (entre 22 et 30). Il est fort probable que cette relation soit difficile à appliquer pour des glissements dans des matériaux très hétérogènes ou faisant intervenir des surfaces de glissement complexe ou encore appartenant à des types très divers. De plus, les mesures doivent être faites sur des indices importants c'est-à-dire sur l'arrachement principal ou sur le bourrelet frontal, ce qui n'est guère possible dans le cas de mouvements complexes (superposition d'un mouvement superficiel sur un autre plus profond, indices de glissement désordonnés).

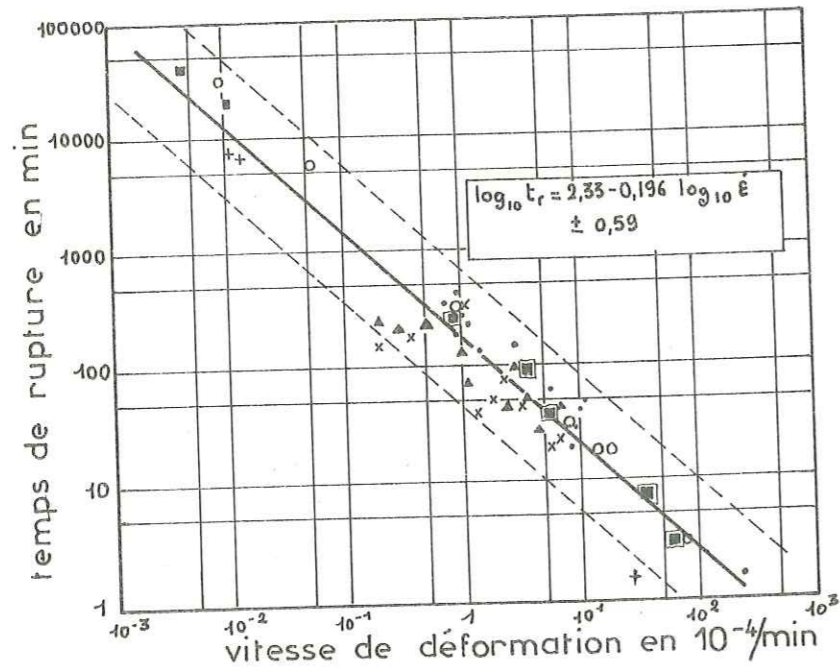
d) La courbe déplacements en fonction du temps montre une série de tronçons croissants et de paliers (fig. 73d).

C'est le cas le plus fréquent ; pour un glissement donné il existe souvent en effet des cycles d'activation et de stabilisation de durée plus ou moins longue en fonction des variations d'intensité des facteurs d'instabilité. Un des phénomènes de périodicité de mouvement le plus évident est celui régi par les conditions climatiques et par les actions de l'eau sous toutes ses formes. On connaît l'influence des niveaux de plan d'eau libre sur un versant en mouvement (Vajont Longarone) il en est de même des corrélations directes entre niveau piézométrique et déplacement. Les Suédois et les Norvégiens contrôlent leurs versants en solifluxion en fonction des cycles de température. Enfin dans de nombreux cas de mouvements surtout si ceux-ci sont superficiels, les cycles pluviométriques commandent la périodicité des déplacements soit directement, soit indirectement, en provoquant des crues auxquelles les coulées sont très sensibles, pour ne citer que cet exemple. Toutefois, la périodicité climatique peut être difficile à analyser, une même quantité d'eau pouvant s'accompagner de quantités de déplacements très différents : soit une stabilisation constante, soit au contraire, une reprise d'activité. Rentrent alors en jeu, les notions de déphasage et surtout celles d'intensité d'averse dont nous avons déjà parlé au chapitre des causes de glissement (chapitre 2).

L'étude de ces corrélations est très importante, car elle doit permettre pour un glissement déterminé d'établir des abaques de déplacement destinés à prévoir les différentes périodes de réactivation et à distinguer entre celles qui font partie d'un cycle normal et celles qui, au contraire, pourraient être les indicateurs de la rupture.

III°, E - 6-2 - Répartition et direction de mouvement.

La représentation en plan des mouvements (courbes ou secteurs d'égal déplacement ou d'égale vitesse) permet de différencier, du moins en surface, les zones actives et calmes. De plus elle met en évidence les éléments freinants et les secteurs où il y a vitesse maximum ; la méthode des alignements transversaux à la direction de glissement adoptée à Léaz (retenue de Génissiat) rend parfaitement compte de cette répartition.



- Terre argileuse Tonegawa
- x Argile Kawasaki
- ▲ Silt Tonegawa
- Argile Fukiage
- ▣ Résultats de S. Murayama
- + " " A. Casagrande
- " " M. Goldstein

Fig.74 Rapport entre le temps de rupture par fluage et la vitesse de déformation.

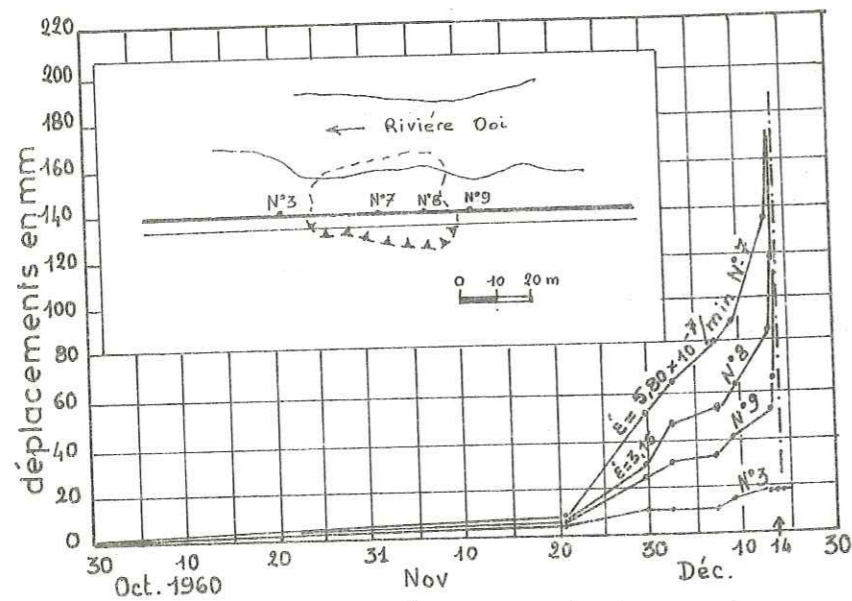
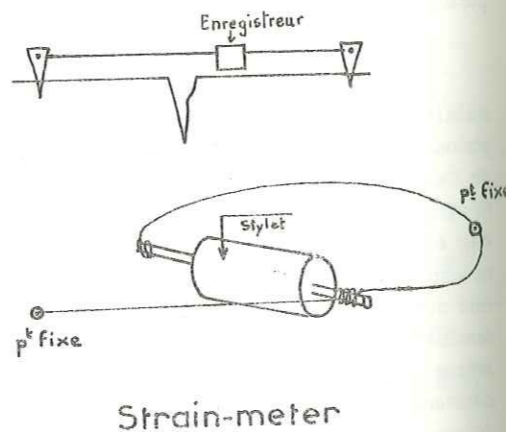


Fig.75. Rupture d'un mur de la route d'Ooigawa (Japon) d'après M.SAITO



Toutefois, comme nous l'avons dit plus haut, il est nécessaire de connaître les trois directions de mouvements de façon à tracer les trajectoires des différents témoins ; cette opération n'a été réalisée que partiellement à Léaz dans les berges de la retenue où les mesures traduisent une certaine divagation qui outre les erreurs toujours possibles, pourraient signifier un mouvement superficiel de plaques d'argile. TER-STEPANIAN a examiné pendant quatre ans une coulée dans des argiles éocènes ; où la masse de terre serpentait de gauche à droite à la manière d'un cours d'eau. Il a pu mettre ainsi en évidence des éléments freinants sur les bords de la coulée qui obligeaient la masse de terre dans son mouvement général à changer de direction. Le freinage était dû, soit à un ancien glissement enterré comme en "E", soit à un ancien talus Rissien enterré : "F", soit au prolongement d'une crête interglissement comme en "G".

L'étude des vecteurs de mouvement (résultante des déplacements horizontaux et verticaux) fourni quelques renseignements sur le mécanisme et l'allure des déplacements : des vecteurs parallèles à la surface topographique signifient un déplacement superficiel ou aussi une translation suivant une surface privilégiée de même inclinaison ; des vecteurs plongeant dans le versant indiquent un mouvement suivant des surfaces ou des amorces de surfaces de forme circulaire.

De la même façon, les inclinomètres donnent l'image de la déformée d'un tube soumis à des déformations profondes ; suivant que le tube sera rompu ou coudé brutalement à un endroit donné ou que la courbure sera progressive, on dira qu'il y a mouvement de translation selon une surface de glissement définie ou qu'il y a déformation plastique. Dans tous les cas de figure ils indiqueront en outre les épaisseurs de volumes instables.

III°, E - 7 - Conclusions à l'étude cinématique des glissements.

Le contrôle des mouvements d'une masse de terre ou de roches constitue donc le seul moyen :

- de détecter l'instabilité d'un versant ;
- de quantifier son évolution ;
- de prévoir l'issue du glissement par l'analyse des périodes d'accélération des vitesses.

Pour ce faire, il est indispensable d'effectuer deux sortes de contrôle :

- un contrôle de surface qui, dans certain cas, peut suffire à donner une image satisfaisante des déplacements, nous pensons ici plus spécialement aux mouvements superficiels de solifluxion ou de reptation ou encore aux différentes sortes de coulées.
- un contrôle de profondeur destiné à tester les mouvements de masse suivant des surfaces de glissement plus ou moins profondes.

Quelle que soit la méthode adoptée (surface ou inclinomètre) le succès et la rentabilité des informations ne peuvent être assurés que grâce à l'exactitude des mesures de contrôle et celles annexes susceptibles de fournir des renseignements sur la périodicité des mouvements.

IV° - CAUSES PROBABLES DU GLISSEMENT ETUDIE.

Tous les éléments descriptifs ayant trait aussi bien au site qu'au glissement lui-même constituent la base de toutes les hypothèses que l'on peut formuler au sujet des causes probables du mouvement.

Comme nous l'avons décrit au deuxième chapitre, deux notions principales sont à considérer.

IV°, A - LES CAUSES LOINTAINES OU CONSTANTES DU VERSANT.

Ce sont celles susceptibles d'induire et de faciliter l'action d'autres facteurs que nous avons définis comme étant des variables ou causes finales. Ceci justifie d'ailleurs les études précises conseillées aux paragraphes II° et III° de ce chapitre sur :

- la géométrie externe du versant et essentiellement sur les mesures de pente de la surface topographique ;
- la géométrie interne du versant en insistant notamment sur l'importance de la répartition des différents volumes de terrain et sur les discontinuités génératrices de surfaces privilégiées de formes diverses favorisant le glissement ou le limitant ;
- la géométrie des circulations d'eau superficielles et surtout profondes ;

- la nature pétrographique et mécanique des matériaux les plus aptes à glisser ;
- les conditions climatiques moyennes régnant habituellement sur la région ;
- l'histoire du matériau et du versant aussi bien à l'échelle géologique qu'humaine.

IV°, B - LES CAUSES FINALES.

Elles représentent essentiellement les modifications de toutes sortes, naturelles ou artificielles capables de modifier rapidement et brutalement l'équilibre d'un versant ou d'un talus. Ce sont les modifications de pente, de répartition des contraintes (suppression de support, tremblement de terre, surcharge), de circulations d'eau.

L'analyse des causes doit toujours susciter deux sortes de questions :

- la mise en mouvement était-elle raisonnablement prévisible et pouvait-elle être évitée ?
- pour quelle raison, dans deux secteurs voisins y-a-t-il pour l'un l'instabilité, et pour l'autre stabilité ?

V° - AGE DU GLISSEMENT - PERIODICITE.

L'âge d'un glissement, même s'il est parfois difficile à apprécier, est une notion importante à prendre en compte. A cet effet, nous avons distingué trois grands groupes.

- a) Les glissements anciens (de tous types) d'âge géologique ; les glissements alpins dits postglaciaires ou interstadias en sont un exemple.
- b) Les glissements anciens de la période historique qui peuvent être souvent une remise en mouvement partielle des premiers.
- c) Les glissements récents dont les formes sont encore relativement fraîches.

Les deux premières catégories sont dangereuses à plusieurs points de vue.

- Les glissements anciens peuvent avoir des formes très estompées ou être recolonisés par la végétation risquant ainsi de passer inaperçus aux yeux de non spécialistes qui en construisant des ouvrages risquent de remettre en question la stabilité de tout un versant.

- A la faveur de ces glissements, les matériaux et la géométrie même du versant ont été en général très désorganisés et sont en équilibre instable ; en outre, on sait que les propriétés mécaniques deviennent de plus en plus mauvaises au fur et à mesure des mouvements en particulier lorsqu'il s'agit de matériaux très argileux.

- Enfin, il est difficile de savoir à quel stade ils en sont et de préjuger des cycles de réactivation. Ceci nous amène à parler sommairement de la périodicité des glissements de terrain.

+ Dans le temps, on peut définir une périodicité journalière, mensuelle, saisonnière, annuelle ou pluriannuelle. Mis à part les cycles journaliers et mensuels de mouvement pour un glissement actif en fonction des conditions météorologiques dont nous avons déjà parlé, il existe une périodicité propre de déclenchement de glissement. La périodicité annuelle ou saisonnière est souvent nettement en rapport avec les variations de température et de précipitation. L'historique des "laves" du torrent de Pontamafrey entre 1732 et 1965 en est un exemple ; sur 28 laves répertoriées entre 1732 et 1951, 19 se sont produites en juillet-août, période en général très orageuse, or on sait que les crues et laves du torrent de Pontamafrey sont pratiquement exclusivement le fait d'orages violents (L. ANCHIERRI, 1966) ; les coulées suivantes de 1952 et surtout celles de juin 1965 sont aussi en relation plus ou moins nette avec la pluviométrie, mais vient s'ajouter en plus un élément supplémentaire qui est celui de la présence d'un glissement de débris très actif au niveau du bassin d'alimentation et en rive gauche du torrent.

La périodicité journalière et mensuelle de déclenchement de glissement de terrain est beaucoup moins connue et étudiée ; pour l'école russe et en particulier pour E.P. EMEL'JANOVA (1959), elle est liée à l'action du soleil et de la lune et à la superposition de leur attraction au champ de la pesanteur et aux phénomènes de marées, "L'influence de l'attraction solaire et lunaire se conjuguant avec la gravitation terrestre, provoquent directement des variations correspondantes sur l'intensité de la force de pesanteur agissant sur les massifs des roches composant le versant. Ces variations ont une périodicité journalière avec des maxima mensuels. L'amplitude des variations d'in-

tensité de la force de la gravité est de 0,12 % avec un maximum à minuit et un minimum à midi et provoque des oscillations correspondantes de coefficient de stabilité des versants. Ainsi pour les versants exposés au Nord et au Sud, les conditions de stabilité les plus défavorables se présentent à minuit et pour ceux qui sont exposés à l'Est et à l'Ouest respectivement le matin et le soir".

La périodicité pluriannuelle est encore plus mal connue, six stations russes d'étude de glissement ont cependant mis en évidence une périodicité de 11 ans en bonne corrélation directe avec la périodicité de l'activité solaire, le maximum du nombre de glissement correspondant à une augmentation du nombre des taches solaires. Pour M.S. EJGENSON (1957) une accentuation de l'activité solaire amène le renforcement de la circulation atmosphérique et, par conséquent, une accélération de l'altération, de l'érosion, et de la dénudation (1).

+ Dans l'espace, un premier type correspond à la répétition d'un glissement dans un seul et même secteur du versant ; la période entre chaque mouvement étant égale à la durée d'un cycle total de glissement (phase préparatoire + rupture + déformation postérieure). Un deuxième type est celui de la périodicité des glissements dans les différents points d'une région donnée. Dans les deux cas, seule une étude statistique permet de déterminer cette fréquence.

EMEL'JANOVA (1959) a étudié la durée des cycles de glissement dans la région d'Odessa. "Pendant la durée d'un cycle complet de glissement à la suite de l'affouillement et du glissement de surface, un volume de roche : W est érodé, ce qui correspond en plan à la différence entre les contours du versant avant chaque nouveau glissement de premier ordre. Pour une hauteur constante du plateau et des couches horizontales et pour une pente moyenne de versant sensiblement constante on a $W = a.H$ en m³".

où a = largeur moyenne du gradin de glissement nouvellement formé en mètre.
H = hauteur du plateau en mètre.

Si Q m³ sont enlevés en moyenne par an du fait des mouvements, la durée moyenne du cycle de glissement T est :

$$T = \frac{W}{Q} = \frac{a H}{Q}$$

Si on introduit le paramètre vitesse de recul de la partie supérieure du versant en mètre par an, on a :

$$Q = H.v$$

d'où $T = \frac{a}{v}$

Ainsi pour le littoral en glissement d'Odessa, pour une largeur moyenne du gradin de glissement a = 20 m (sur une période de 100 ans), une hauteur moyenne de 40 m et une vitesse d'abrasion Q = 20 m³ par an et par mètre de côte, le cycle complet de glissement dans la région d'Odessa est de 40 ans en moyenne, ce qui correspond aux observations tendant à montrer que les glissements ont lieu tous les 20 - 50 ans dans un même secteur. Un calcul similaire a été fait pour la vallée de la Volga dans la région de Gorki, où la durée moyenne d'un cycle serait T = 1400 - 2000 ans (2).

Bien entendu, l'étude de la périodicité ne peut prévoir exactement la date du glissement, mais elle peut fixer une probabilité de date de son déclenchement (en début ou en fin de décennie, au printemps ou en automne). La périodicité ne contredit pas non plus l'existence des cycles d'évolution des glissements qui sont de durée variable.

VI° - CONCLUSIONS - PROTOTYPE DE FICHE D'INVENTAIRE DE GLISSEMENT.

Une fois en possession de toutes les caractéristiques principales du glissement et de son environnement, il est possible alors d'établir un programme de prévention ou de correction suivant le cas, adapté au mode de mouvement, à la géométrie du versant, à la nature et aux propriétés de ses matériaux (nous ne traiterons pas au cours de ce travail des différents modes de traitement des glissements.

Comme nous l'avons dit en introduction de ce chapitre, la liste des informations à analyser peut paraître rela-

(1) - EJGENSON, M.S.. "Esquisse des manifestations de l'activité solaire en géographie physique" Editions Univ. L'vov. 1957.

(2) - Tous ces chiffres correspondent à des valeurs moyennes.

tivement longue. Il va de soi que dans certains cas simples et localisés où une décision doit être prise rapidement, l'ensemble des études sera considérablement réduit. Cet essai méthodologique pris dans son intégralité se conçoit surtout dans le cadre de recherches statistiques, d'étude de potentialité de glissement ayant un caractère préventif et jouant un rôle décisif dans le maintien ou le changement de site d'un avant projet donné. Il se justifie aussi pour de nombreux cas de glissements complexes ou d'importance économique non négligeable.

Nous avons résumé dans le tableau n°38 les principales données à prendre en compte, les moyens d'investigation et leur mode de représentation.

En outre de manière à standardiser le plus possible ces données et à les rendre plus facilement exploitables, nous avons essayé de les faire rentrer dans le cadre d'un système de fiche à laquelle nous avons donné le nom de "fiche simplifiée" par rapport à une autre dite "fiche complète" et que nous ne joignons pas à notre étude (1). Cette fiche simplifiée a été élaborée de façon à être remplie par approximation successive à la suite d'observations sur le terrain ; on s'efforcera d'y consigner le maximum de données numériques (mesurées ou observées à une date donnée) et de renseignements nécessaires à la compréhension du mécanisme de glissement.

Le premier volet de la fiche comporte en *recto* : les données sur la localisation du glissement et la description rapide du site (environnement du glissement) accompagné d'une coupe schématique, et en *verso* : les éléments descriptifs du glissement lui-même (géométrie externe, interne, circulations d'eau etc...).

Le deuxième volet est destiné à recevoir en *recto* : les données interprétatives que l'on aura pu raisonnablement formuler (classification, cause, âge, évolution) ceci complété par des renseignements sur les remèdes qui ont déjà été mis en oeuvre pour lutter contre le glissement. Le verso de ce volet est réservé à la partie documentation ayant trait aux personnes, services, publications auprès desquels il est possible d'avoir des renseignements sur la géologie régionale, la topographie, la climatologie, les données mécaniques du glissement.

Ces fiches peuvent être incorporées à un système de classement quelconque destiné à synthétiser les premières observations, en ce sens elles fournissent déjà la matière de base pour certaines études statistiques, toutefois, telles qu'elles sont conçues elles ne peuvent être traitées directement par l'ordinateur. Nous donnerons d'ailleurs dans les conclusions générales quelques précisions théoriques et pratiques à ce sujet.

(1) - La fiche dite "complète" est en fait l'ensemble d'une série de fiches ayant trait chacune à une des rubriques mentionnées ci-dessus (géométrie - nature - cinématique etc...) et que l'on peut réserver à des études poussées sur un glissement donné.

TABEAU N° 38 - METHODOLOGIE D'ETUDE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN.

LOIS MECA. SOL	ECHELLE DES PLANS	REPRESENTATION DES DONNEES	MOYENS D'INVESTIGATION	DONNEES COMPLEM.	DONNEES DE BASE
- Condition générale = Pesaneur - Conditions aux limites : phase solide	- 1/20 000 - 1/5 000 : étude du site - 1/5 000 - 1/1 000 : étude du glissement - 1/100 - 1/500 : profils topographiques	- Carte géomorphologique - Coupes topographiques - Carte des points bas - Coupes hypométriques - Courbe de fréquence de replats	- Observations sur le terrain - Interprétation photos aériennes - Comparaison plans photogramétriques - Nivellement précis - clinomètre - Topographie (plans) - Statistique et répartition des indices de glissement	- Altitudes - Exposition du versant	- Penes de la surface topographique (initiale et glissée) - Formes morphologiques représentatives de la région - Formes d'ensemble et de détail de la masse glissée.
- Condition aux limites - phase solide	- 1/20 000 - 1/5 000 : étude du site - 1/5 000 - 1/1 000 : étude du glissement - 1/100 : logs de sondage	- Carte géologique - lithologique - Carte sédimentologique - Coupes - Logs de sondages - Diagrammes de fracturation - Coupes de niveau des surfaces de faiblesse privilégiées supposées avec indication des penes	- Observations sur le terrain - Interprétation photos aériennes - Etudes travaux souterrains existants - Etude géophysique (maillage serré) - Dérouillage - tranchées - Sondage de reconnaissance précis - Puits visitables - Etudes de fracturation - Etudes sédimentologiques	- Géométrie des grains et de l'assemblage	- Lithologie - stratigraphie - Continuité et épaisseur des couches - Pente de la stratification - Fracturation (toutes les échelles) - Détermination grands ensembles structuraux - Détermination des surfaces privilégiées de faiblesse
- Conditions aux limites : phase liquide - Contraintes imposées par la phase liquide.	- 1/20 000 - 1/5 000 : étude du site - 1/5 000 - 1/1 000 : étude du glissement	- Carte hydrogéologique - réseau superficiel - réseau profond - émergences - points d'infiltration - Logs hydrogéologiques - perméabilité - porosité - Carte de battement de nappe	- Observations sur le terrain - Photos infrarouges - Sondages - forages - mesures de perméabilité localisation des circulations - Mesures de débits - Mesures de niveau fréquentes (niveau piézométrique - plan d'eau libre).	- Analyse de l'eau - % d'infiltration - rétention	- Eau de surface : répartition - nature - débit - cote. - Eau souterraine : localisation - répartition - épaisseur exutoires - nature - variations de niveau.

	NATURE DES MATERIAUX	CONDITIONS CLIMATIQUES	HISTOIRE DU VERSANT ET DES MATERIAUX	CINEMATIQUE
DONNEES DE BASE	<ul style="list-style-type: none"> - Nature pétrographique et minéralogique : différents constituants - Détermination fine de la fraction argileuse : % par rapport aux autres fractions - Nature mécanique : <ul style="list-style-type: none"> . Identification (limites - densité - teneur en eau etc...) . Etude de la résistance dans les conditions les plus pessimistes (essais lents, consolidés, non drainés) . Etude de la résistance le long des surfaces de faiblesse 	<ul style="list-style-type: none"> - Précipitations, liquides, solides - Température - Intensité, durée des averses - des périodes de gel - Corrélations avec données cinématiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Histoire tectonique - Histoire glaciaire - Histoire fluviale - Histoire sismique - Histoire de l'altération - Fréquence de glissement - Histoire des interventions humaines 	<ul style="list-style-type: none"> - Quantité de déplacement - Vitesse - accélération - Trajectoires des mouvements - Vecteur de mouvement - Contrôle des mouvements profonds - Corrélations avec données climatiques et hydrogéologiques
DONNEES COMPLETES	<ul style="list-style-type: none"> - Nature thermique - Nature électrique - Variations des propriétés au cours et après le glissement 	<ul style="list-style-type: none"> - Végétation - Bilan du bassin versant 	<ul style="list-style-type: none"> - Age du glissement - Périodicité de glissement 	<ul style="list-style-type: none"> - Surveillance écartement des fissures et crevasses dans le glissement
MOYENS D'INVESTIGATION	<ul style="list-style-type: none"> - Etude labo classique sur échantillons non remaniés, Triaxial - compression simple - cisaillement direct - Etude in situ : cisaillement - pénétration 	<ul style="list-style-type: none"> - Réseau hydrométéorologique - enregistrement continu 	<ul style="list-style-type: none"> - Bibliographie - Enquêtes - Contrôle et surveillance du versant lors d'implantation d'ouvrages - Photo aérienne 	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle de surface - Contrôle de profondeur (inclinomètre) - Planning et respect des fréquences de mesures
REPRESENTATION DES DONNEES	<ul style="list-style-type: none"> - Courbes effort - déformation 	<ul style="list-style-type: none"> - Hyéogramme - Hydrogramme - Tableau des pluies classées - Courbe température moyenne - maxima - minima 	<ul style="list-style-type: none"> - Carte de statistique de glissement - Carte des interventions humaines 	<ul style="list-style-type: none"> - Courbes de déformations en fonction du temps - Carte des trajectoires - Courbes ou secteur d'égal vitesse ou d'égal déplacement - Représentations statistiques - Corrélations
LOIS MECAN. SOUS	<ul style="list-style-type: none"> - Propriétés des matériaux - Lois rhéologiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Conditions aux limites : contraintes imposées au versant 	<ul style="list-style-type: none"> - Conditions aux limites : contraintes anciennes et récentes 	

ETUDE DE GLISSEMENT		FICHE SIMPLIFIEE	
I - LOCALISATION PRECISE DU GLISSEMENT		N° D'ORDRE	
COMMUNE :	VALLEE (BASSIN) :	COORDONNEES (x =	
LEU-DIT :	VOIE DE COMMUNICATION AFFECTEE :	D'UN POINT (y =	
VILLE LA PLUS PROCHE :		MOYEN (z =	
DEPARTEMENT :	CARTE TOPOGRAPHIQUE :	MISSION PHOTO AERIENNE :	
II - DESCRIPTION GENERALE DU SITE			
A - GEOMETRIE EXTERNE DU SITE		Coupe schématique - carte - photo :	
<ul style="list-style-type: none"> - VERSANT (TALUS) = concave - convexe - rectiligne - à replats (1) - PENTE MOYENNE = régulière - irrégulière (1) - EXPOSITION : ALTITUDE : MAXI = MINI = - GRANDES FORMES MORPHOLOGIQUES = Falaise - Terrasse - (cotière - glaciaire fluviale) - plateau - versant de vallée - dépression - combe - replat glaciaire - glissement ancien - cône - éboulis (1) 		Suite fracturation : PORNE = ouverte - fermée - remplissage - humide - sèche - 4° GRANDES FORMES STRUCTURALES = série isoclinale - série plissée - série tabulaire chevauchement - nappe - effondrement (1)	
B - GEOMETRIE INTERNE		C) GEOMETRIE DES CIRCULATIONS D'EAU	
1° TERRAINS DE COUVERTURE NATURE = EPAISSEUR MOYENNE = MAXIMUM = 2° SUBSTRATUM : NATURE = STRATIFICATION = Pendage moyen = conforme - inverse EPAISSEUR MOYENNE DES STRATES INTERLITS = Inexistants - Existants - Epaisseur : 3° FRACTURATION : NATURE : fissures - joints - failles (majeures - mineures) - chevauchement schistosité - foliation (1) DIRECTION MOYENNE = PENDAGE = MAILLE = SUPERFICIE AFFECTEE :		-1- SOURCES (1) Nombreuses - peu nombreuses - disséminées localisées : débits : < 1 l/s - 1 l/s à 5 l/s - > 5 l/s -2- ZONES HUMIDES (1) Nombreuses - peu nombreuses - pérennes temporaires - disséminées - localisées Surface totale affectée : - 3 - RUISSELLEMENT (1) infiltration - infiltration hiérarchisé - non hiérarchisé (1) débit moyen. - 4 - EAU SOUTERRAINE (1) Présence de nappe - circulations diffuses - 5 - PLAN D'EAU LIBRE - Lacs (naturel - artificiel) - rivière (sinueuse - rectiligne) - canalisation - galerie (pertes) (1)	
		D) VEGETATION DOMINANTE	
		Forêt - Taillis - Cultures - prairies - maquis - landes - rocailles (1)	

(1) Rayer la ou les mentions inutiles - et en ajouter s'il y a lieu.

III - DESCRIPTION DU GLISSEMENT		C - GEOMETRIE INTERNE	
A - LOCALISATION DU GLISSEMENT		1°) LITHOLOGIE	
GENERALISE A TOUT LE VERSANT = Oui - Non		Terrain (s) affecté (s) =	
LOCALISE = Tête du versant - Pied - Milieu - bord de terrasse - talweg (1)		Transformation (s) éventuelles (s) apportée (s) à la géométrie du site :	
		pente = succession lithologique =	
		épaisseur =	
B - GEOMETRIE EXTERNE		2°) SURFACE DE GLISSEMENT	
1°) DIMENSIONS		Visible - non visible - localisation =	
Epaisseur de terrains affectés = 0 à 2 m - 2 à 5 m - 5 à 10 m - 10 à 20 m - 20 à 50 m - > 50 m		forme dominante = courbe - plane -	
Longueur moyenne : largeur moyenne :		Pente = Présence de stries =	
Altitude de la tête : Altitude de la base :		Origine = fracture - contact terrain dur - terrain tendre - contact substratum - terrain de couverture - contact de terrain de perméabilité différente (1)	
Surface totale affectée : Pente moyenne :		Nombre = surface (s) définie (s) - zone de faiblesse	
2°) ASPECT DE SURFACE		3°) CUBAGE DE MATERIAUX INSTABLES	
Arrachement principal (aux) (1)		D - CIRCULATIONS D'EAU	
Fissures de surface - cravasses (1)		1°) SOURCES (1)	
Nombreuses - peu nombreuses		Nombreuses - peu nombreuses	
groupées - non groupées		débit =	
longitudinales - transversales		Localisées - disséminées -	
En arc de cercle - rectiligne		Origine =	
Ouverture moy. =		2°) ZONES HUMIDES (1)	
Profondeur moy. =		Nombreuses - peu nombreuses	
Maille =		localisées - disséminées	
		Surface totale affectée -	
Bourrelet (1)		3°) RUISSELLEMENT (1)	
Nombreux - peu nombreux		> infiltration - infiltration diffuse - localisée - dirigée	
Localisation =		facilité - obitéré par glissement	
Groupés - non groupés		érosion forte - faible	
réguliers-irréguliers		4°) TENUE EN EAU DES MATERIAUX	
long. moy = hauteur moy. =		densité = forte - faible	
Extrémité = convexe oblique		d'une façon généralisée	
convexe vertical		localisée (1)	
		5°) INFILTRATIONS PROVOQUEES	
		F - CINEMATIQUE	
		- Aspect pris par les objets rigides	
		- décalage de chemin - route etc...	

IV - HISTOIRE GEOLOGIQUE	
- HISTOIRE GEOMETRIQUE	
- HISTOIRE PLUVIATILE PASSEE ET RECENTE : épigénie - crues - formation de méandre.	
- HISTOIRE GLACIAIRE PASSEE ET RECENTE :	
- HISTOIRE CLIMATIQUE	
- HISTOIRE SISMIQUE :	
- HISTOIRE DES INTERVENTIONS HUMAINES :	
V - CLASSIFICATION	
- EROULEMENT :	
- GLISSEMENT PROPREMENT DIT :	
- COULEE :	
- SOLIFLUXION :	
- REPTATION :	
VI - CAUSES PROBABLES	
1°) CAUSES LOINTAINES	
- Causes géométriques externes : pente - exposition	
- Causes géométriques internes :	
dispositions des différents volumes	
pente de stratification	
fracturation	
- Géométrie des circulations d'eau	
- Causes faisant entrer en jeu la nature des matériaux	
- Causes climatiques	
2°) CAUSES FINALES	
- Suppression de support (frontal - basal - latéral) naturelle ou artificielle :	
- Surcharge naturelle ou artificielle :	
- Vibrations naturelles ou artificielles :	
- Actions de l'eau : précipitations - infiltrations provoquées - variations de plan d'eau (vidange rapide)	
VII - AGE DU GLISSEMENT - Etat le jour de la visite	
1°) - GLISSEMENT ANCIEN D'AGE GEOLOGIQUE	
- stabilisé - non stabilisé - remise en mouvement complète, partielle	
- formes nettes - estompées	
2°) GLISSEMENT ANCIEN HISTORIQUE	
- Date approximative	
- Stabilisé, non stabilisé - remise en mouvement complète, partielle	
- Formes, nettes, estompées	
- Fréquence des mouvements	
3°) GLISSEMENT RECENT	
- Date : actif - menaçant - relativement stabilisé	
VIII - REMEDES MIS EN OEUVRE	
Avec succès - sans succès	
1°) MESURES PREVENTIVES	
Contournement - drainages - mesures confortatives	
2°) MESURES CORRECTIVES	
Drainage : de surface - de profondeur - tranchées - galerie - puits - drains subhorizontaux	
Mesures confortatives = murs - gabions - enrochements	
Traitements chimiques	
Reboisement	
Traitement spéciaux - électrosmose - chauffage	

ENQUÊTES (1)	
RENSEIGNEMENTS DIVERS	RENSEIGNEMENTS SUR LE GLISSEMENT
<p>RENSEIGNEMENTS SUR LE SITE</p> <p>- <u>GÉOLOGIE</u> : (publications - études - travaux de reconnaissances)</p> <p>- <u>MATÈRE DES MATÉRIEAUX</u> : (études - publications - organisme à consulter)</p> <p>- <u>HYDROGÉOLOGIE - HYDROLOGIE</u> :</p>	<p>- <u>ÉTUDE</u> : (date du glissement, apparition de fissures, bourrelets, fréquence de mouvement)</p> <p>- <u>DOCUMENTS ET CONTRÔLE TOPOGRAPHIQUES</u></p> <p>- <u>MATÈRE MÉCANIQUE DES MATÉRIEAUX</u></p> <p>- <u>TRAVAUX DE RECONNAISSANCE DES PROPRIÉTÉS SUR LE GLISSEMENT</u></p>
<p>NUMÉRO(S) du (des)</p>	<p>NUMÉRO de l'ORGANISME :</p>

(1) faire mention dans chaque rubrique des lieux de prêt des publications, des organismes ou services à consulter

CHAPITRE V°

UN EXEMPLE D'APPLICATION

LE GLISSEMENT DE LEAZ (Ain) EN RIVE DROITE DE LA RETENUE DE GENISSIAT

INTRODUCTION

Afin d'illustrer l'essai méthodologique entrepris au chapitre IV°, nous proposons un exemple d'application. Parmi les "glissements" qu'il nous a été donné d'étudier, nous retiendrons celui de Léaz (Ain) en rive droite de la retenue de Génissiat, parce que contrôlé et étudié plus complètement (des études complémentaires sont d'ailleurs prévues notamment dans le domaine de l'infrastructure hydraulique du glissement et de l'implantation d'ouvrages destinés à stabiliser les mouvements). Nous ne consignerons ici que les observations principales ; des renseignements plus détaillés pourront être consultés dans le rapport de synthèse que nous avons rédigé à l'attention de la Compagnie Nationale du Rhône (1). Ce chapitre est divisé en cinq parties suivant le schéma général proposé ci-dessus.

I° - BREF APERÇU DE LA GEOLOGIE REGIONALE.

Nous sommes là, dans la partie la plus orientale des chaînons jurassiques, côtoyant ce qu'on appelle la zone molassique périalpine qui forme suivant une ligne molasse de Genève - plaine du Bas-Dauphiné, la limite de deux ensembles géologiques différents : le domaine alpin et le domaine jurassien. La carte géologique (feuille Nantua 1/80 000, 3e édition) montre deux régions principales délimitées approximativement par "l'accident de l'Avocat" : une région dite occidentale et une dite orientale. La région orientale de la feuille, seule, nous intéresse.

Elle est constituée essentiellement du bassin molassique de Bellegarde prolongé au Nord par le synclinal de la Valsérine et au Sud par les synclinaux molassiques de Rumilly et du Rhône. Le bassin molassique à fond plat de Bellegarde est limité immédiatement à l'Ouest et à l'Est par de larges dômes anticlinaux d'âge jurassique et crétacé moyen (anticlinal du Crêt du Nû à l'Ouest - anticlinaux du Crêt-d'Eau et Mont Vuache à l'Est).

Des dépôts glaciaires (moraine argileuse, argile lacustre, alluvion fluvio-glaciaire) amenés par le grand glacier rhodanien et ses émissaires locaux, viennent recouvrir le synclinal molassique et s'étalent sur toute cette région, en constituant les plateaux ondulés que l'on voit s'étendre entre les deux dômes anticlinaux est et ouest. Ces terrains datés du Wurm présentent des faciès divers que nous allons étudier plus en détail dans les pages suivantes.

Toutes ces formations différentes sont entaillées en de profondes vallées étroites (canon), par le Rhône et ses affluents.

II° - DESCRIPTION DU SITE (versant rive droite du Rhône)

II°, A - GEOMETRIE DU VERSANT.

II°, A - 1 - Géométrie externe actuelle.

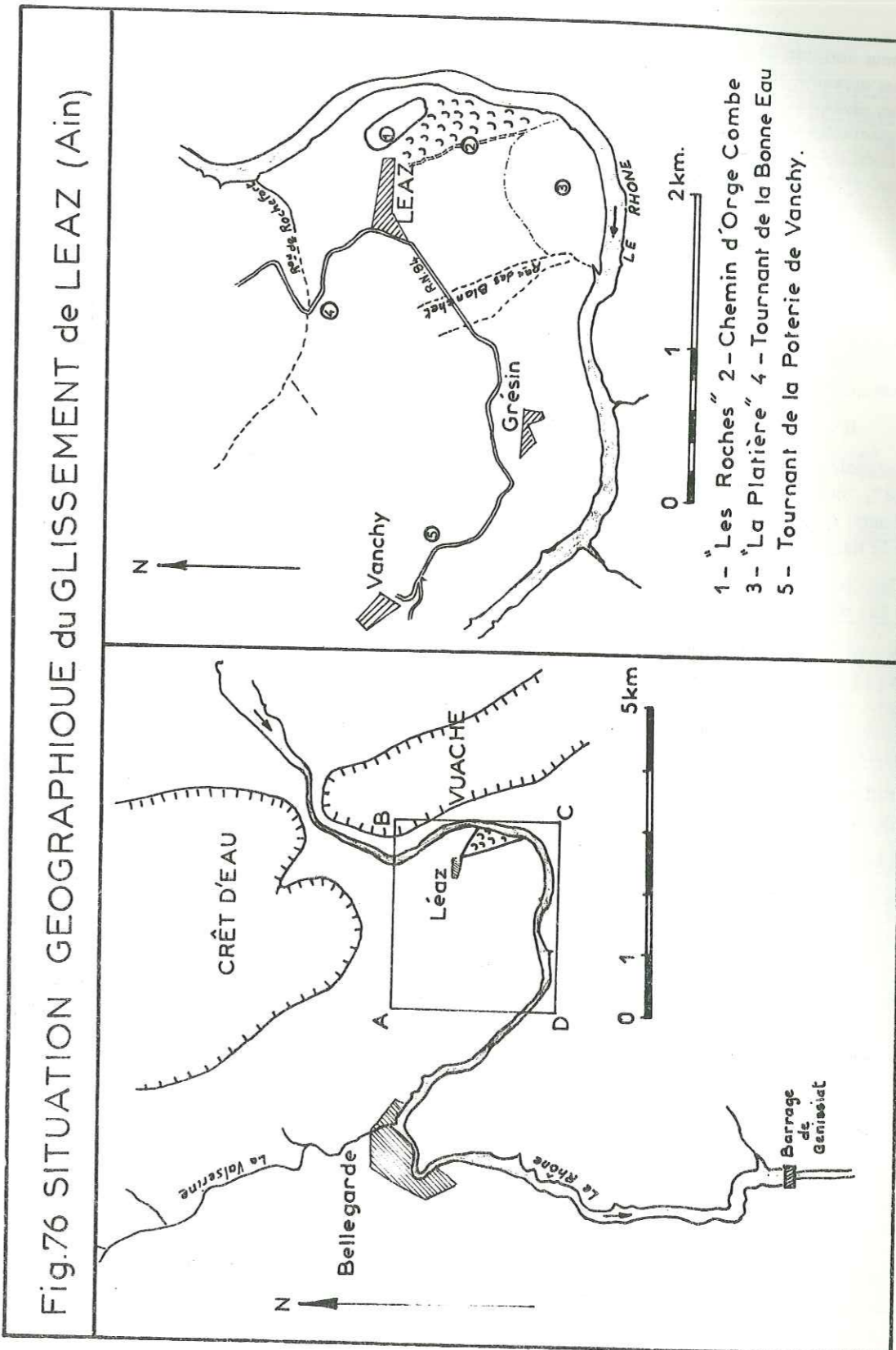
II°, A - 1-1 - Données topographiques et géographiques.

Nous nous intéresserons essentiellement au versant rive droite du Rhône, inscrit dans le "méandre" Fort l'Ecluse - Bellegarde et plus précisément au quadrilatère A B C D compris entre le lieu-dit "les Pieuses", le lieu-dit "Entre-mont", le lieu-dit "Le Moulin" et le confluent du Rhône et du Nant de Gorge (fig. 76).

Le versant ainsi délimité, d'exposition sud-est, culmine à 740 m au pied du Crêt d'Eau pour s'abaisser à 313 m, cote du lit du Rhône actuel (le niveau de la retenue étant à la cote 330,70 m environ). Sa pente moyenne générale est de 8°, donc à classer dans les pentes faibles peu propices aux mouvements de terrain de grande amplitude. Cette pente n'est pas régulière et se décompose en une série de zones relativement plates et de ruptures de pente que l'on peut grouper en 4 niveaux principaux.

- un niveau 1, de la cote 750 à la cote 580 correspondant au plateau molassique, reposant sous une épais-

(1) - "Etude de la stabilité des berges de la retenue de Génissiat - Glissement de Léaz" - Rapport de synthèse - Compagnie Nationale du Rhône D.X. G.C. - J.P.B./D.N. 4431 (12/8/68). On y trouvera notamment de nombreux tableaux et diagrammes ayant trait à la géométrie des matériaux, leur nature et aux mouvements contrôlés depuis 3 ans.



- un niveau 2, de 580 à 400 avec une pente de 10,5°.
- un niveau 3, de la cote 400 à 370 correspondant à la terrasse de "La Platière" faite d'alluvions post-glaciaires et très nettement marquée dans la topographie ; ce niveau n'est pas toujours aussi apparent, il est même souvent escamoté notamment dans le secteur du défilé de Grésin.
- un niveau 4, de la cote 370 à la cote 330 ayant une pente moyenne forte : 27°. On peut le subdiviser en deux selon la courbe du niveau 350.

- + secteur 4a : de 370 à 350 pouvant correspondre localement à une deuxième terrasse de "La Platière" ou à celle de la région de la gare de Longeray.
- + secteur 4b : de 350 à 330 à pente plus forte, environ 30°.

Ces quatre niveaux ne correspondent pas obligatoirement à des stades de terrasses. On adoptera comme altitude moyenne dominante la cote 500 - 510 du niveau 2, qui semble correspondre dans toute la région aux têtes des principales zones instables.

II°, A - 1-2 - Données morphologiques.

La morphologie dominante consiste en un paysage typique de dépôts morainiques, c'est-à-dire une topographie "moutonnée", "ondulée", drainée par un réseau hydrographique peu dense et restant superficiel sur une grande partie de son parcours, excepté le canõn étroit du Rhône et le talweg encaissé du Rau de Rochefort.

Dans la monotonie générale, il est cependant possible de distinguer 3 types principaux de formes représentatives du versant.

- Les zones relativement plates.

- plateau de Léaz (niveau 2) ;
- complexe de "La Platière" (niveau 3 et 4) ;
- lieu-dit "Les Condières" (niveau 3 et 4) ;
- la région d'Entremont (niveau 3 rive gauche du Rhône) ;
- le plateau correspondant au niveau 1.

Ces différentes zones sont pratiquement indemnes de mouvements de terrain. Bien plus, certaines d'entre elles, comme "La Platière" joue le rôle de massif stabilisant.

- Les zones en relief.

Outre le Crêt d'Eau - Mont Vuache, que le Rhône traverse en cluse, il existe des pointements localisés comme :

- les "Roches de Léaz" (calcaires) ;
- la cuesta molassique de Vanchy - Grésin.

Certains de ces reliefs (Roches de Léaz) ont été très certainement le siège de mouvements du type écoulement. L'entaille en dièdre au front des "Roches de Léaz" témoigne d'un écoulement contemporain des stades glaciaires car nous retrouvons dans les berges de la retenue, une brèche calcaire enrobée d'argile glacio-lacustre et d'alluvions fluvio-glaciaires.

- Les zones déprimées.

- le triangle du glissement de Léaz ;
- le talweg de Rochefort ;
- le talweg de Blanchet ;
- la "Combe Gerle".

Ces dépressions constituent en général des zones très instables, et sont affectées de désordres de surface importants. Parmi celles-ci, le "glissement de Léaz" retiendra plus particulièrement notre attention. Toutefois, l'observation des autres secteurs instables et notamment des environs du tournant de "la Bonne Eau" (sur R.N. 84, au Nord Ouest de Léaz) permet de faire des comparaisons utiles.

II°, A - 2 - Géométrie interne actuelle.

II°, A - 2-1 - Lithologie, stratigraphie (fig. 77).

Nous ferons les deux subdivisions classiques : substratum et terrains de couverture.

1 - Le substratum.

Il n'affleure qu'assez peu dans tout le versant. Les deux termes lithologiques rencontrés sont d'une part les grès et sables molassiques et, d'autre part, les calcaires du Jurassique supérieur des "Roches de Léaz" et Crétacé moyen de certains de ses satellites. Nous ajouterons un troisième terme correspondant à des marnes bigarrées très froissées rencontrées en sondage et dont nous n'avons pu prouver l'appartenance stricte à une formation donnée.

. La molasse burdigalienne.

Elle est constituée essentiellement de

- + grès verdâtres, plus ou moins grossiers, à ciment calcaire et indurés,
- + niveaux sableux verts, argileux, tendres et à grains fins,
- + niveaux conglomératiques (rencontrés dans les sondages du tunnel S.N.C.F. du Crêt d'Eau).

Elle affleure en deux endroits principaux

- + la cuesta entre Grésin et Vanchy érodée au niveau de "Combe Gerle" par les matériaux glaciaires ; vers Léaz, elle forme le niveau 1 sous un faible recouvrement,
- + le canõn du Rhône (défilé de Bange-Grésin) où elle donne lieu à des "abrupts" s'écroulant par plaques de temps à autre.

Elle constitue le synclinal à fond plat de Bellegarde et atteint une épaisseur d'environ 250 m au centre et va en s'amincissant dans des proportions variables vers l'anticlinal du Crêt d'Eau - Vuache. Outre les variations d'épaisseurs dues à la forme synclinale et à la position discordante, il faut tenir compte aussi d'une érosion interglaciaire certainement violente provoquant une topographie molassique irrégulière et en conséquence un remplissage alluvial plus ou moins important suivant les endroits. Vers l'Ouest, elle est érodée par les formations pré-wurmiennes de la Valserine ; vers l'Est, elle s'enfonce sous les alluvions pré-wurmiennes du Rhône.

. Les marnes bigarrées.

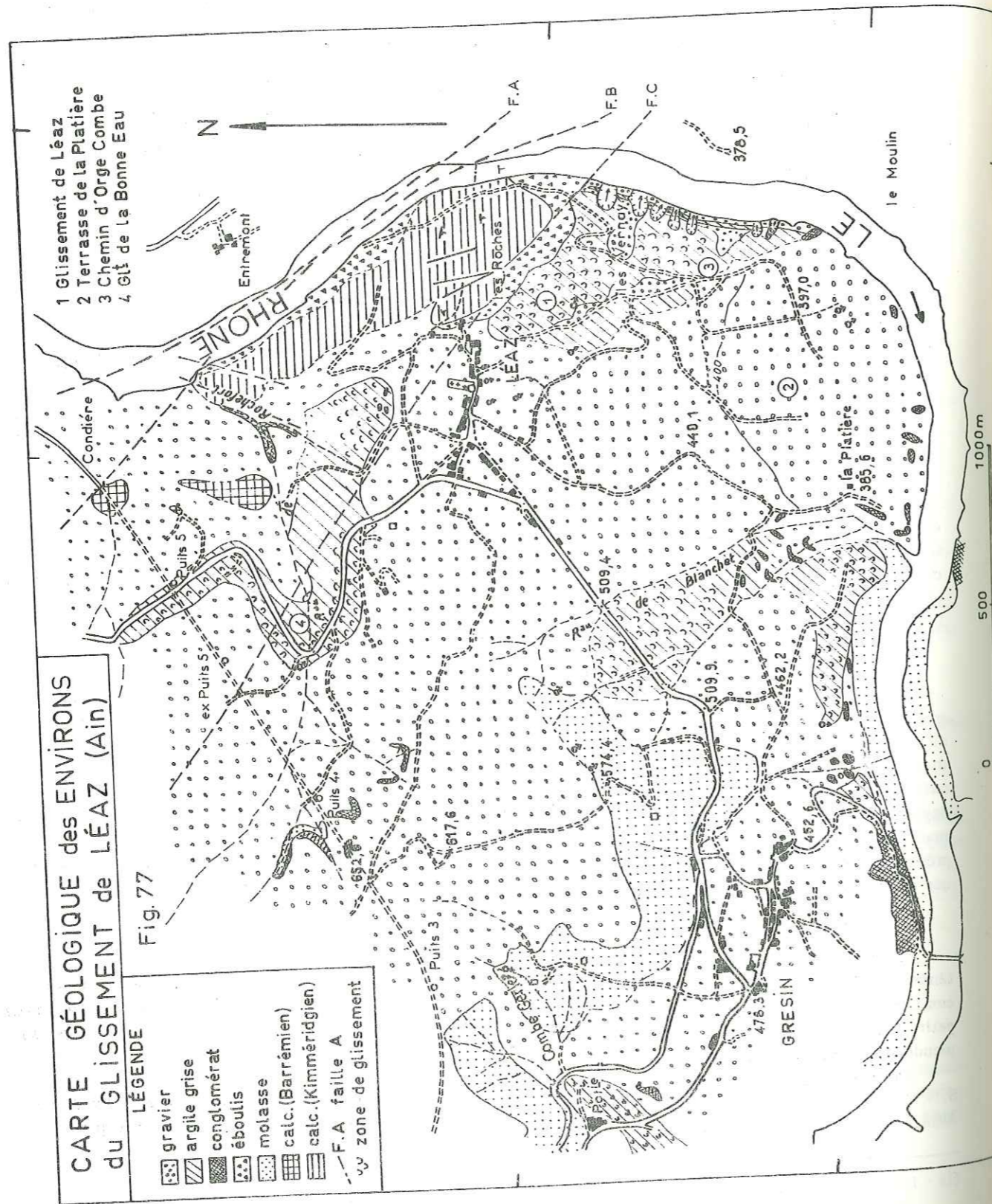
Trois sondages S.M. 5, S.M. 4, S.M. 2, implantés dans la zone en mouvement se sont arrêtés dans des marnes bigarrées, froissées, fracturées, portant des traces de cisaillement. Elles pourraient appartenir à l'Aquitaniens ou faire encore partie de la molasse burdigalienne. Des lavages ont fourni une microfaune et une flore (pauvre et en mauvais état) d'ostracodes et de charophytes (1). La coupe du tunnel S.N.C.F. les signale aussi en position synclinale reposant en discordance sur les calcaires. Leur épaisseur et leur position exacte restant indéterminées, les sondages ne les ayant pas traversées entièrement (il pourrait s'agir aussi d'une tête de couche glissée). De plus, ces marnes ont certainement subi des remaniements violents au cours des périodes glaciaires, ce qui expliquerait la présence de niveaux argileux à leur partie supérieure, ayant sensiblement les mêmes caractéristiques mécaniques que des argiles lacustres des terrains de couverture dont nous reparlerons par la suite.

. Les calcaires.

Le substratum calcaire apparaît dans la région de façon bien délimitée, sous la forme des "Roches de Léaz" témoin du flanc ouest de l'anticlinal Crêt d'Eau - Vuache. Il est représenté par le "complexe Kimméridgien" épais constitué du Séquanien supérieur : calcaires gris brun, jaunâtre, parfois rosâtre et fortement altérés et fissurés, en petits bancs ; et surtout du Kimméridgien : calcaires massifs en gros bancs, foncés en patine, blancs en cassure, pseudo-oolithiques et à grains moyens ou fins.

Nous retrouvons d'autres affleurements disséminés en rive gauche du torrent de Rochefort et à la tête du tunnel S.N.C.F. vers Longeray gare. Ce sont des calcaires blanc jaunâtre, pseudo-oolithiques, en gros bancs que Yener ARIKAN attribue au Barrémien inférieur à "faciès russillien".

(1) - Les lavages ont été effectués au laboratoire de Géologie et Minéralogie de Grenoble (service de Micropaléontologie).



Enfin, pour trouver les séries complètes, il faut aller vers l'anticlinal Crêt d'Eau - Vuache. (série allant de l'Argovien jusqu'au Barrémien).

Le substratum se résume donc à trois termes lithologiques, parmi lesquels la molasse gréseuse et les marnes bigarrées retiendront surtout notre attention. Ces premières observations nous permettent déjà de formuler certaines conclusions utiles à l'étude de la stabilité générale de la région, à savoir :

- les calcaires sont stables et constituent des éléments freinants,
- la molasse gréseuse et sableuse se trouvant suivant les endroits très près de la surface ou, au contraire à des profondeurs assez grandes, conditionne ainsi l'existence de volume plus ou moins important de terrains de couverture présumés instables,
- la surface du substratum molassique irrégulière a une pente moyenne de 10° suivant un axe nord ouest - sud est, conforme à la pente de la surface topographique qui laisse à penser que ce substratum pourrait jouer éventuellement le rôle de "glissoir",
- à la surface de la molasse, il peut y avoir une couche de décompression dont les propriétés mécaniques risquent d'être dangereuses.

2 - Les terrains de couverture.

Ils représentent l'élément lithologique dominant du secteur étudié et de par leur épaisseur, leur nature, leurs propriétés revêtent une très grande importance dans le cadre d'une étude de stabilité. Nous abordons là, le domaine des hypothèses, et il nous faudra tenir compte de quatre causes principales d'incertitude :

- les variations d'épaisseur et de faciès des terrains glaciaires sont très fréquents, tant dans le sens horizontal que vertical,
- la région a été affectée pour une grande partie par des mouvements de glissement plus ou moins profonds qui ont pu provoquer un brassage important des terrains,
- il subsiste encore des doutes sur la localisation exacte d'un lit antéwurmien du Rhône et de ses affluents jurassiens, notamment dans le secteur gare de Longeray - village de Léaz - Bange, problème conditionnant directement l'épaisseur des terrains de couverture aux abords immédiats du glissement de Léaz,
- enfin, l'étude des dépôts glaciaires de la région a fait l'objet de nombreuses interprétations différentes voire complètement divergentes.

Toutefois, MM. GIGNOUX et MATHIAN, dans leur note "les enseignements géologiques du grand barrage de Génissiat sur le Rhône" (T.L.G.G. tome XXIX - 1951) ont proposé une première synthèse à laquelle nous nous référons pour clarifier certaines observations.

Pour plus de simplicité, nous étudierons surtout les formations les plus représentatives et celles dont l'extension est la plus constante.

Le versant de Léaz - Grésin est couvert de dépôts wurmiens mis en place au cours d'avancées et de reculs successifs du glacier rhodanien franchissant le seuil du Crêt d'Eau - Vuache et de ses émissaires jurassiens. Les observations de surface et les coupes de sondage (C.N.R. - Ponts et Chaussées - S.N.C.F.) nous permettent de distinguer, de haut en bas, quatre grandes formations.

a) On trouvera d'abord une formation à dominante gravier - galets - sables enrobés dans une matrice argileuse jaune ou brune d'importance variable (20 à 30 % d'argile - 70 à 80 % de gravier et galets). Les éléments sont de dimensions variables, les plus gros galets observés faisant 20 cm de diamètre. Certains niveaux sont conglomérés. On y rencontre aussi des niveaux de sablons argileux, d'épaisseur variant entre 0,30 m et 1 m.

Par l'abondance des éléments arrondis, cette formation peut être qualifiée de fluvio-glaciaire et correspond aux derniers mouvements du glacier rhodanien et aux alluvions charriées par les torrents de l'époque coulant au front du glacier.

Nous donnerons, à cette formation, le nom de "couche graveleuse supérieure"; elle est à rattacher à ce que les auteurs appellent complexe wurmien, moraines graveleuses ou moraines de retrait. On la retrouve couvrant de grandes superficies "moutonnées", son épaisseur est variable, pouvant atteindre des chiffres de l'ordre de 200 m. Aux environs du glissement, elle varie entre 0 et 50 m.

On la retrouve dans le glissement sous forme d'une lentille de 10 à 25 m d'épaisseur, constituée essentiellement de galets arrondis dans le secteur sud du glissement et de blocs calcaires assez anguleux enrobés de sables et argiles jaunes dans la partie centrale et vers les "Roches de Léaz".

b) Vient ensuite une couche d'argile, lacustre, grise, fine, assez compacte, varvée plus ou moins nettement selon les endroits. Cette formation correspond à l'appellation "glacio-lacustre" wurmienne de MM. GIGNOUX et MATHIAN.

La présence de cette argile grise peut être considérée comme une des causes d'instabilité. Partout où elle affleure, elle est le siège de mouvements de terrain. L'épaisseur de la couche argileuse est très variable, il faut tenir compte, en effet, de la partie supérieure ayant déjà glissée. Les divers sondages mécaniques et géophysiques donnent une "fourchette" allant de 5 m à 40 m.

- A l'intérieur de cette couche d'argile grise, outre la lentille de gravier citée ci-dessus, on rencontre fréquemment des lentilles de sablons argileux, humides, dont l'épaisseur varie de 0,50 m à 2 m (épaisseur moyenne la plus fréquente = 0,80 m).
- Il n'est pas rare de trouver au sommet de cette couche, un niveau d'argile sableuse, gris beige, varvée, épais de 1 m à 2,50 m contenant parfois quelques galets. Ce niveau supérieur traversé par les sondages mécaniques des Ponts et Chaussées est visible à l'affleurement dans le talus amont de la R.N. 84, dans le tournant de "la Bonne Eau" où il provoque des désordres de surface très importants.
- Il existe enfin parfois des niveaux peu épais de graviers.

Ce matériau argileux apparaît donc dans le détail assez hétérogène ; mais à l'échelle du versant, nous le considérons comme un élément lithologique homogène ayant une géométrie propre que nous allons définir. Il est important en effet de connaître son extension et partant sa continuité. Nous la retrouvons un peu partout entre Léaz et Vanchy : coulée de la Poterie de Vanchy - glissement sous Grésin - glissement du tournant de "la Bonne Eau" - pente rive droite du talweg de Rochefort - glissement de Léaz. Entre ces points et plus spécialement dans la région du village de Léaz et vers la Platière, nous ne la voyons plus affleurer et cela correspond en outre à une absence d'indice de glissement actif ; les corrélations entre sondages, notamment S.M. 5, S.M. 1, S.M. 1bis, nous avait amené à formuler deux hypothèses.

- La couche argileuse n'est pas continue et nous aurions affaire à des lentilles plus ou moins importantes délimitant ainsi autant de zones instables. Mais cette hypothèse semblait aller à l'encontre des données cartographiques et de certains travaux souterrains (puits S.N.C.F.).
- Cette couche est continue et prendrait la valeur d'un niveau stratigraphique compris entre deux couches de graviers, mais les cotes du toit des argiles seraient différentes en raison d'une faille ayant joué ou rejoué au Quaternaire suivant la direction du chemin d'Orge Combe.

Une prospection électrique (1) a été effectuée, en vue de lever cette indétermination. Elle a confirmé la continuité de la couche d'argile grise aux abords du glissement sans mettre en évidence une faille mais plutôt une sorte de môle de gravier dans l'axe du chemin d'Orge Combe (2) et un môle calcaire dans la partie nord du plateau de Léaz. Les argiles lacustres se seraient donc déposées sur une surface d'érosion très irrégulière faite de creux et de bosses, expliquant ainsi dans certains secteurs le manque apparent de continuité et les épaisseurs extrêmement variables. La pente du plancher des argiles varie entre 2° et 20° conformément à la surface topographique. Elles peuvent reposer soit directement sur la molasse (certains secteurs entre Grésin et le Rhône) soit sur le calcaire (Nord du plateau de Léaz) soit indirectement par l'intermédiaire d'une couche de graviers et conglomérats que nous allons étudier maintenant.

c) Au-dessous de l'argile grise existent souvent des graviers, sables, conglomérats que nous conviendrons d'appeler "couche de graviers inférieure". Cette formation pourrait correspondre en partie à ce que MM. GIGNOUX et MATHIAN nommaient "complexe interglaciaire". Il faut distinguer deux choses :

- le faciès à blocs calcaires peu émoussés, de diamètre moyen : 15 à 20 cm, enrobés d'argile jaune dans des proportions variables ou de sables moyens à grossiers. On trouve ce faciès essentiellement à proximité des massifs calcaires, témoins, soit d'éboulis anciens remaniés, soit de venues fluvio-glaciaires très localisées en bordure du seuil Crêt d'Eau - Vuache.

(1) - Rapport inédit : "projet de prospection géophysique dans la région du glissement de terrain de Léaz". Compagnie Nationale du Rhône - J.P.B./DN 3 820 (février 1968).
 (2) - Ce môle de gravier fait partie de la "couche de graviers inférieure".

- des alluvions plus ou moins bien stratifiées à caractère nettement fluvial comprenant des graviers, sables et des conglomérats, visibles en de nombreux endroits sous des formes différentes et à des cotes variables sur les bords du Rhône. Les faciès principaux sont les conglomérats du remplissage antéwurmien du Rhône et de la Valserine.
- les alluvions du Rhône préwurmienne sont des conglomérats stratifiés, à patine foncée et à pourcentage dominant de galets alpins de toute nature, à ciment surtout sableux et graveleux.
- les alluvions de la Valserine préwurmienne sont elles, de couleur claire, de taille plus réduite. Le ciment est plus nettement calcaire et les galets de calcaire dominant.

Entre ces deux termes principaux, il existe toute une série de conglomérats intermédiaires situés à des cotes trop élevées pour faire partie des remplissages préwurmien du Rhône et de la Valserine. Leur pourcentage de galets calcaires nous fait penser à des dépôts dus à des torrents marginaux longeant le glacier et recevant des apports en provenance du Jura.

Cette "couche de graviers inférieure" reste souvent en relief formant ainsi des points durs et stables le long des berges du Rhône. Toutefois ces alluvions sont masquées, en partie, par les coulées déclenchées dans l'argile grise, notamment en rive droite entre les "Roches de Léaz" et Grésin.

d) La quatrième formation observée est très localisée, il s'agit des terrasses postglaciaires de "La Platière" emboîtées dans les formations précédentes, qu'elles éroderaient en partie. Ces terrasses sont constituées de graviers sableux, calibrés, secs et jouent le rôle de massif drainant stabilisant les pentes morainiques et la couche d'argile grise située en amont.

En conclusion, le versant peut donc se diviser en deux grands volumes.

- un volume essentiellement molassique correspondant au terme lithologique dominant du substratum que l'on considérera comme homogène à l'échelle du versant. Ce volume a la forme d'une gouttière très aplatie, d'axe approximativement nord-sud pentée vers le Sud de 5 à 7° et dont les bords s'amincissent à l'approche des dômes calcaires. La surface de cette gouttière est très irrégulière du fait de l'érosion fluviale et glaciaire lors de la divagation des deux cours d'eau importants de la région, le Rhône et la Valserine. Il faut donc s'attendre à des variations d'épaisseurs importantes des terrains de couverture.

Ce volume délimite les zones stables représentatives de la région, canõn du Rhône, zones de plateau.

- Au-dessus repose un volume hétérogène constitué de terrains meubles représentant la couverture quaternaire. Nous y avons distingué 3 couches principales d'épaisseur variable, de nature très différente et dont les dispositions théoriques ont pu être perturbées par des glissements anciens.

Cette masse de terrains de couverture constituant l'élément dominant visible en surface est à considérer comme dangereuse du point de vue de la stabilité générale du fait de la présence quasi continue d'une couche d'argile lacustre suspecte, pentée conformément à la surface topographique et affectée de nombreux mouvements de terrain superficiels, du genre solifluxion et coulée.

II°, A - 2-2 - Géométrie de la fracturation.

La chaîne du Crêt d'Eau - Vuache est découpée par trois grands systèmes de fractures :

- des failles longitudinales découpant les massifs en bandes longitudinales, leurs directions sont en général Nord Ouest - Sud Est.
- des failles secondaires transverses, de direction nord - sud.
- des décrochements est -ouest transverses à la chaîne et affectant surtout les flancs ouest et le sommet du Crêt d'Eau.

Seules les failles longitudinales auront quelque intérêt pour nous. D'après la thèse de Yrener ARIKAN, et nos observations, la région des "Roches de Léaz" est le point de croisement de trois grandes failles longitudinales (fig. 77).

- une première faille (A) passe à l'Est des "Roches de Léaz", traverse le Rhône et rejoint la partie ouest du bloc calcaire supportant le château d'Arcine. Elle est postérieure à toutes les autres puisqu'elle les recoupe.
- une faille (B) à rejet vertical de 180 m passant aussi à l'Est des "Roches de Léaz" et rejoignant le château d'Arcine.

- une faille (C) inverse passant cette fois-ci à l'Ouest des "Roches de Léaz" dans le glissement. Cette faille est la plus ancienne, et sans doute, la plus importante.

Un certain nombre de fractures secondaires existent aux abords du confluent du Ruisseau de Rochefort avec le Rhône et découpent la terminaison nord ouest des "Rochers de Léaz".

Les failles longitudinales risquaient d'avoir une influence néfaste sur la tenue des terrains argileux du secteur de Léaz en permettant des apports d'eau supplémentaires, notamment dans le cas de l'accident (C). Mais nous pouvons raisonnablement exclure cette hypothèse, car cette faille décrochement, en admettant même qu'elle joue le rôle de drain, est court-circuitée par le talweg de Rochefort, l'apport d'eau restant possible à partir du plateau de Léaz serait donc insignifiant.

II°, A - 2-3 - Géométrie des matériaux.

a) Les conglomérats.

Ils sont de nature diverse et affleurent en de nombreux endroits soit sous la forme de couches, soit sous celle de blocs isolés plus ou moins déchaussés à la suite de glissements.

On les rencontre principalement sur les berges du ruisseau de Rochefort, à l'entrée de Bellegarde, sur le bord de la R.N. 85, sous le village de Grésin, sous le plateau de Léaz et sur les berges du Rhône où ils forment des points durs canalisant les coulées argileuses sans oublier ceux situés sous le village de Bange et sous "la Platière" (conglomérats antéwurmien). Ils sont très hétérogènes en granulométrie quel que soit le type. L'assemblage des galets est assuré par un ciment calcaire ou graveleux et leur solidité est de ce fait, variable.

b) Les graviers.

Ils sont très hétérogènes, mal classés et soumis à des variations de faciès très fréquents. Ce sont, tantôt des graviers fluvioglaciers crus ou sableux, tantôt des blocs morainiques de 5 à 8 cm de diamètre moyen (les plus gros blocs faisant en moyenne 20 cm de diamètre ; il en existe cependant de beaucoup plus importants sur les berges du Rhône vers la cote 370 - 360, disséminés sur une grande partie du front du glissement), à matrice sableuse et argileuse. Il existe un troisième type représenté par les graviers plus calibrés formant des terrasses de "La Platière". Certains d'entre eux à matrice sablo-argileuse sont solides et admettent des pentes fortes.

c) Les argiles et sablons.

Les argiles sont varvées, compactes, à texture fine. La rythmicité des varves et leur épaisseur sont très variables, cette dernière varie entre 5 mm et 1 cm pour les varves sableuses. Dans certains cas, par contre, les varves laissent la place à de véritables lentilles de 0,80 à 1,50 m d'épaisseur, ceci se vérifie, non seulement en sondage, mais aussi en surface dans le tournant de la Poterie de Vanchy ou sur la piste construite dans le glissement de Léaz.

Les grains des sablons et des sables sont retenus, à des degrés divers, par des films très fins d'argile. Ces varves sableuses constituent des niveaux à faible résistance à l'intérieur de la masse compacte argileuse.

II°, A - 2-4 - La géométrie des circulations d'eau.

II°, A - 2-4-1 - Le réseau hydrographique se résume à deux choses principales :

- des cours d'eau structuraux régis en partie par la fracturation des terrains. Ce sont les cas de la plupart des torrents descendant du Crêt d'Eau, d'une partie du ruisseau de Rochefort et du Rhône dans la région de Longeray - Roches de Léaz. Ces cours d'eau sont en général encaissés;
- des cours d'eau non structuraux alimentés par des sources sortant de la couche de gravier supérieure ou du contact terrain de couverture - substratum molassique. Ces cours d'eau : torrent des Blanchet, ruisseau de Nanbin, s'encaissent moins vite et leur talweg est plus large. Leur débit est faible, certains sont même considérés comme temporaires.

En-dehors de ces ruisseaux, il existe d'autres écoulements artificiels (écoulement des eaux du village de Léaz) ou naturels (écoulement de source). Le ruissellement l'emporte sur l'infiltration dans les secteurs très argileux et non glissés, par contre, les infiltrations deviennent importantes au niveau des graviers et des zones glissées (fissures - crevasses).

II°, A - 2-4-2 - Les sources sont nombreuses mais de débit relativement faible. Mis à part celles liées aux calcaires fissurés du Crêt d'Eau, nous distinguerons trois catégories principales de sources :

- des émergences correspondant au contact molasse - terrains de couverture, localisées au niveau 560-580 notamment dans la région de la naissance du ruisseau des Blanchet. Elles constituent les captages de Combe Gerle et de Vanchy, et sont pérennes.
- des émergences liées au contact zone de gravier supérieure et couche d'argile grise ; elles sont nombreuses de débit faible et peuvent tarir.
- des sources en relation avec les différents glissements, elles aussi sont nombreuses avec des débits faibles et possibilité de tarissement en été.

Enfin, de nombreuses zones de suintement accompagnent les parois de gravier, telles celles existant dans la muraille de gravier bordant le chemin menant du village de Grésin au pont du même nom.

II°, A - 2-4-3 - Les nappes

Nous manquons d'observations précises sur la présence et la localisation de plusieurs nappes.

- La couche supérieure de gravier est le siège d'écoulements diffus et sans doute très discontinus plutôt que d'une véritable nappe aquifère ; les sondages mécaniques de la C.N.R. et des Ponts et Chaussées ont rencontré des niveaux à fort suintement à des cotes variables. La perméabilité est aussi très variable, elle peut être très forte comme le montrent les pertes totales de boue au sondage S.M. 1 bis. Ces écoulements sont alimentés par les pluies et les réserves du massif calcaire du Crêt d'Eau.
- La couche inférieure de gravier renferme une véritable nappe susceptible de se mettre en charge dès que les sorties naturelles dans le canon du Rhône sont oblitérées par les coulées boueuses du glissement de Léaz. Le comportement de cette nappe a été très certainement influencé par la hausse de niveau du Rhône lors de la mise en eau du barrage de Génissiat.
- Le contact molasse - terrain de couverture argileux (dans le cas où la couche inférieure de gravier n'existe pas) est le siège de circulations.
- La molasse sera considérée comme imperméable et ne renfermera donc pas de réserves aquifères au sens hydraulique du terme. Cependant, à proximité de la retenue, la teneur en eau peut augmenter du fait de la capillarité ; la retenue pourrait ainsi provoquer une humidification ascendante et causer au contact avec les terrains de recouvrement des désordres graves mais nous manquons de points de mesures et d'observations pour vérifier cette hypothèse.
- La couche d'argile grise contient des lentilles plus ou moins importantes de sables, sablons, graviers formant des "poches d'eau" dont certaines sont en pression. Les divers travaux d'élargissement de la route nationale confirme cette hypothèse, notamment dans le tournant de la "Bonne Eau" où nous avons estimé entre 3 et 5 l/s le débit sortant d'un groupe de lentilles de gravier et de sable, au mois de septembre 1967. Quand ces lentilles sont constituées de sable, une fois entaillées, l'eau s'écoule rapidement entraînant les grains et provoque des coulées très fluides et des affaissements locaux du toit argileux de la poche (la poche peut se vider brutalement et l'affaissement sera très rapide).

II°, A - 2-4-4 - Plan d'eau libre.

Il est représenté ici par la retenue de Génissiat ayant fait monter le niveau du Rhône d'une quinzaine de mètres. L'épaisseur d'eau est de 17 m (en comptant à partir de la cote normale de la retenue : 330,70) pour une hauteur de berge de 67 m, soit un pourcentage de submersion de 25 %, ce qui est relativement faible.

Les variations de niveau sont de petite amplitude (1 à 2 m de battement moyen dans une journée et un battement maximum moyen de 4 à 5 m pour une semaine ; périodiquement ont lieu des chasses amenant la retenue à la cote 316).

II°, A - 2-4-5 - Conclusions.

Ces observations nous permettent d'énoncer les quelques conclusions suivantes :

- le coefficient de ruissellement étant assez fort par endroit entretient l'action de l'érosion régressive et

provoque une augmentation de la teneur en eau en surface. Si l'infiltration l'emporte au niveau de replats de glissement et de secteurs très fissurés et crevassés, l'eau humidifiera plus profondément la couche argileuse et alimentera les lentilles de gravier et de sable.

- La présence de circulations nombreuses bien que diffuses et discontinues dues à la structure même des alluvions est suffisante pour accroître les risques d'instabilité, si celles-ci viennent contaminer la couche d'argile grise. Le danger sera encore accru s'il y a mise en charge.
- La présence de poches de sable en charge à l'intérieur de la couche argileuse constitue un autre élément préoccupant dans le cadre d'une étude de stabilité.
- Les nombreuses venues d'eau bien que de faible débit (perméabilités très variables) nous permettent de considérer la région comme humide.

II°, B - NATURE PETROGRAPHIQUE ET MINERALOGIQUE DES MATERIAUX.

Nous insisterons essentiellement sur les terrains argileux et marneux, pour ce faire, nous décrirons d'une façon simple les constituants principaux en mettant en relief tout ce qui se rapporte aux argiles.

II°, B - 1 - Le substratum.

Les formations intéressantes sont la molasse sableuse, gréseuse et les marnes bigarrées.

a) La molasse.

Elle est constituée essentiellement de :

- grès feldspathiques à ciment calcaire avec des grains de quartz, anguleux, dominant, des feldspaths dont certains sont décomposés, des cristaux de chlorite se combinant avec la glauconie.
- niveaux tendres à grains fins, sables argileux à composition similaire, mais avec un pourcentage d'argile assez fort donnant à la roche un toucher onctueux. Ces niveaux argileux se désagrègent au contact de l'eau. Le résultat de cette désagrégation se traduit par ce que les ingénieurs de la S.N.C.F. à Bellegarde appellent "les volcans de boue" - "les champignons de boue" - "les fromages blancs" qui ont causé et causent toujours des déboires quant à la bonne tenue de la plate-forme ferroviaire du Crêt d'Eau.

Ce processus joue un rôle important dans l'instabilité des terrains de couverture, une telle décomposition peut constituer de véritables "couches savon" au toit du substratum devenu ainsi un "glissoir".

Nous n'avons pas noté en forage de forte décomposition des niveaux molassiques même dans les couches tendres argileuses.

b) Les marnes bigarrées.

Elles sont très argileuses par endroit, allant même jusqu'à former de véritables lentilles d'argile à l'intérieur d'une masse plus carbonatée et plus solide.

L'analyse thermo-différentielle d'un échantillon révèle la présence d'illite, chlorite et de montmorillonite dans les pourcentages approximatifs suivants :

Illite : 20 %	par rapport au pourcentage total
Chlorite : 10 %	de minéraux argileux.
Montmorillonite : 70 %	

La montmorillonite est donc particulièrement abondante dans certains niveaux de ces marnes et dépassent même les valeurs trouvées pour les argiles grises (voir tableau n° 39). Celle-ci est un minéral nocif car elle peut absorber ou perdre de l'eau facilement et changer de volume en passant d'un état à l'autre. De tels niveaux à montmorillonite prédominante constituent des points faibles dans la masse des marnes déjà très fissurée.

Les niveaux carbonatés à forte proportion de calcite, de feldspaths et de produits ferrugineux sont plus solides et peuvent résister très bien à l'action de l'eau ; nous en prendrons pour exemple les difficultés de dissociation dans l'eau, de ces marnes pour effectuer des lavages destinés à l'étude micropaléontologique.

IDENTIFICATION MINERALOGIQUE DE QUELQUES ECHANTILLONS D'ARGILE ET DE MARNE

N°	LOCALISATION	NATURE	MINERAUX			% CARBONATES	% PARTICULES INFERIEURES A 2 μ
			ILLITE	CHLORITE	MONTM.		
3	Surface	Argile grise moile	4	4	2	26 %	33 %
5	S.M. 2 à 5,00 m.	Argile grise dur-cissant rapidement	3	3	4	31,2 % à 32,4 %	18 %
6	S.M. 2 à 33,00	Marnes bigarrées argileuses	2	1	7	41,60 % à 42,80%	40 %
9	S.M. 5 à 4,40 m.	Argile grise dans secteur actif	4	4	2	24,0 % à 24,4 %	-
12	S.M. 5 à 18,00 m.	Argile jaune	4	2	4	29,0 % à 30,02 %	-

- Analyses effectuées par le Laboratoire de Géologie de l'Université de STRASBOURG
 - Les chiffres de 1 à 10 indiquent de manière semi-quantitative la proportion des minéraux argileux entre-eux.

II°, B - 2 - Les terrains de couverture.

Nous étudierons essentiellement la fraction argileuse qu'elle soit sous forme d'une véritable couche (argile grise) ou de matrice enrobant des graviers. L'argile grise est assez calcaire (les pourcentages varient de 25 % à 30 % de carbonates).

Le pourcentage pondéral de particules argileuses (inf. à 2 microns) tiré des analyses sédimentométriques est aussi très variable en fonction des varves sableuses présentes dans la masse argileuse ; il peut atteindre des proportions importantes, jusqu'à 50 %.

Les sédiments argileux qu'ils soient jaunes ou gris contiennent toujours trois sortes de minéraux argileux, illite, chlorite, montmorillonite. Cette dernière provoque d'une façon plus spectaculaire que pour les marnes, des changements d'état dans la masse argileuse ; certains niveaux de l'argile grise durcissent rapidement à l'air libre (2 à 3 jours) et fondent ensuite à la moindre humidité alors que d'autres gonflent et restent humides longtemps.

II°, C - NATURE MECANIQUE DES MATERIAUX.

La campagne de sondage a permis de prélever des échantillons de sol non remaniés (échantillons Mazier) dans le glissement et en-dehors. Les premiers résultats permettent de distinguer deux types de matériaux (voir tableau 40).

1° Des sables plus ou moins argileux, caractérisés par des limites de liquidité basses (inférieures à 28 %) des limites de plasticité impossibles à calculer par la "méthode des boudins", des teneurs en eau variant de 18 à 27 %. Les essais triaxiaux révèlent des cohésions faibles (0,25 à 0,35 bar) et des angles de frottement variant de 4 à 20° (caractéristiques apparentes).

2° Des argiles plastiques peu consolidées, varvées ou non, contenant parfois de minces niveaux de petits graviers. Les limites de liquidité sont plus élevées, en moyenne 50 % et les indices de plasticité varient de 25 à 28 %. Les cohésions sont moyennes : 0,40 à 0,70 bar et il y a peu ou pas de frottement (angle de frottement de 0 à 2°).

Le pourcentage de particules argileuses est élevé, un des échantillons pris à la surface des marnes bigarrées contient 57,5 % de particules inférieures à 5 microns. Les argiles grises ne sont pas sensibles St = 1,2 (résultats fragmentaires).

Les essais d'identification mettent en lumière le processus de solifluxion et de coulées : la teneur en eau avoisinant et dépassant même les limites de liquidité et de plasticité quand ces dernières existent. Une limite de retrait basse permet aussi d'expliquer le pouvoir de fissuration de l'argile grise non préconsolidée (la densité sèche variant de 1,50 à 1,70). La fraction argileuse existe dans la plupart des échantillons avec des pourcentages non négligeables.

Enfin, il est à remarquer que plusieurs échantillons se sont rompus avant essai, suivant des surfaces préférentielles : varves sableuses, plan de fissure, plan de circulation d'eau dans les marnes.

II°, D - LES DONNEES METEOROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES.

En l'absence de mesures hydrogéologiques précises, nous insisterons surtout dans ce paragraphe sur les données météorologiques et plus spécialement pluviométriques de façon à replacer le versant dans son contexte climatique. La station pluviométrique la plus proche de Léaz est celle de Génissiat mise en route en juin 1955.

Des corrélations faites avec l'aide d'autres stations (1) environnantes permettent de placer la région de Léaz dans la zone des 1000 mm/an en moyenne.

- D'une manière générale deux années ont été excédentaires : l'année 1960 et l'année 1965. Pour la station de Génissiat, l'année 1960 totalise 1617 mm d'eau, soit un excédent de 39 % par rapport à la moyenne annuelle, et celle de 1965 1521 mm soit 30 % d'excédent avec des mois de mai, juillet, septembre, novembre, décembre à pluviosité dépassant la normale.

(1) - Les renseignements pluviométriques émanent de la Division Technique Générale de E.D.F. à Grenoble.

TABLEAU N° 40 : PREMIERS ESSAIS MECANIQUE D'IDENTIFICATION SUR QUELQUES ECHANTILLONS

REFE- RENCE	PROF.	Limites d'Atterberg			Teneur en eau	ESSAIS TRIAxiaux	DENSITES			% inf. à 5 μ	NATURE DU MATERIAU	
		L.L.	L.P.	I.P.			ϕ	c (2)	γ_d (3)			γ_h (3)
S.M. 1	8,70 9,70	25,6	/	/	26,7 % (1)	18°	0,80?	1,54	1,97	2,720	2,1 %	SILT SABLEUX
S.M. 1	11,10 11,90	28,7	22,8	5,9	19,9 %	6°	0,37	1,72	2,07	2,728	38,3 %	SILT ARGILEUX UN PEU GRAVELEUX
S.M. 1	22,00 23,00	23,7	/	/	18,0 % 20,4 %	5°	1,30 0,45	1,76 1,68	2,07 2,02	2,700	3,7 %	SILT GRAVELEUX
S.M. 1 bis	9,43 10,50	26,3	/	/	24,1 %	20°	0,35	1,64	2,04	2,706	12,0 %	SILT UN PEU SABLEUX
S.M. 2	5,45 6,50	23,1	/	/	21,7 %	4°	0,25	1,65	2,00	2,714	2,3 %	ARGILE SABLEUSE
S.M. 2	11,50 12,55	23,4	14,4	9,0	19,4 %	5°	0,30	1,77	2,11	2,760	38,0 %	ARGILE SABLEUSE
S.M. 2	16,40 17,45	45,6	20,8	24,8	24,7 %	0°	0,70	1,62	2,03	2,767	60 %	ARGILE MOYENNEMENT PLASTIQUE
S.M. 3	24,65 25,70	50,0	21,8	28,2	25,5 %	2°	0,40	1,60	2,00	2,752	59,5 %	ARGILE PLASTIQUE PEU SABLEUSE
S.M. 4	32,75 33,60	50,9	24,2	26,7	21,4 %	0°	0,40	1,59	2,05	2,746	57,5 %	ARGILE MARNEUSE TRES PLASTIQUE

(1) - N.C.U. = essai triaxial non consolidé, non drainé
 (2) - c = cohésion en bar
 (3) - γ_d = densité sèche en g/cm³ - γ_h = densité à l'état humide en g/cm³ - grain = densité des grains en g/cm³

- Les mois les plus pluvieux en moyenne sont ceux d'août, septembre, novembre, décembre, janvier. En comparant ces données avec les diagrammes de déplacement en fonction du temps, nous constatons que la pluviométrie a une influence très nette sur les mouvements dès qu'il y a excédent d'eau (fig.

- L'année 1965 (surtout au cours des 5 derniers mois et des deux premiers de 1966) accuse des déplacements importants (les plus forts en valeur relative).

- Les mois d'automne et d'hiver correspondent en général à des périodes actives, soit en raison de pluies plus importantes, soit de la neige. Les deux premiers mois de 1968, très neigeux, plus, les pluies abondantes de la fin 1967 (le mois de novembre a enregistré un maximum journalier de 50 mm) se traduisent par une reprise nette des mouvements après un palier de stabilisation au cours de l'été 1967.

Les mesures topographiques n'étant pas suffisamment régulières, nous ne pouvons déterminer d'une manière précise le temps de réponse du terrain aux sollicitations météorologiques. De plus en l'absence de pluviographe enregistreur dans la région de Léaz, nous ne pouvons calculer les intensités d'averse données très utiles à la prévision des mouvements. Le pluviographe qui doit être implanté prochainement à Léaz même fournira des renseignements précieux.

- corrélation entre les conditions pluviométriques régnant au débouché de la cluse du Rhône et celles de Génissiat.
- influence des brouillards stagnant constamment sur la région de Léaz pendant le mois de janvier.
- importance des averses, intensité - durée, influence sur les mouvements.

II°, E - HISTOIRE GEOLOGIQUE DU SITE.

La chaîne du Crêt d'Eau - Vuache a été soumise à une série de surrections (à l'Eocène - au début du Pliocène), de transgressions (Oligocène Burdigalien) et de plissements (plissement majeur à la fin du Pontien). Ensuite il y a eu effondrement du bassin de Bellegarde.

Des quatre glaciations classiques, seules les deux dernières (Riss et Wurm) ont laissé des traces dans la région étudiée.

- Le seul affleurement de Riss connu, outre les formations de Pont Carnot au pied du seuil, est celui décrit par Ad. JAYET (1938) sur le bord de la R.N. 84 avant d'arriver à la molasse du ruisseau de Nanbin.
- Après cette période glaciaire très discontinue étant donné le barrage formé par le Crêt d'Eau, vient la période interglaciaire Riss - Wurm caractérisée par la reprise de l'érosion fluviale et le dépôt d'alluvions caillouteuses plus ou moins bien stratifiées qui seront par la suite consolidés en conglomérats sous le poids des glaces wurmiennes. A cette époque le Rhône n'empruntait pas tout à fait le même cours que celui visible actuellement, il érodait la molasse aux environs de Banges pour rejoindre les Usses (cette branche ancienne a été mise en évidence depuis longtemps par les géologues). Par contre, pour la partie Longeray - Bange où le Rhône décrit actuellement une sorte de grand méandre, on peut se poser la question de savoir si le fleuve a toujours suivi le cours actuel en empruntant les zones de faiblesse que représentent les failles A et B ou si au contraire, il a contourné Léaz par le Nord pour prendre un profil plus rectiligne. Nous n'avons pu mettre en évidence d'une façon indubitable un tel tracé d'un ancien Rhône ni par des observations de surface (les conglomérats rencontrés sont à des côtés trop élevés) ni en sondage (ces derniers n'étant pas prévus pour descendre à des profondeurs de 200 m). Cependant la coupe géologique le long du tunnel S.N.C.F. montre à l'entrée nord du tunnel du Crêt d'Eau un ancien talweg à la cote 380, qui en admettant un passage par Léaz, La Platière, donnerait au fleuve une pente moyenne raisonnable de 3° pour atteindre la cote 300 à Bange. Une telle hypothèse pourrait expliquer en partie la présence du môle de gravier sous le chemin d'Orge Combe représentant alors le flanc d'une ancienne vallée du Rhône ou plus vraisemblablement celle d'un ancien affluent.

- Puis est venue la glaciation wurmienne responsable de puissants dépôts surtout argileux. Le glacier aurait déposé au cours de retraits successifs, soit à son front, soit au fond de son lit des sédiments lacustres, et ce, sur une surface topographique interglaciaire très irrégulière. De temps à autre il y aurait eu des "crachées" de cailloux près du seuil du Crêt d'Eau venant former les lentilles de matériaux plus grossiers à l'intérieur de l'argile. Ceci justifie l'intérêt des reconnaissances préalables de la géométrie de cette couche argileuse que l'on risque de rencontrer très fréquemment dans toute cette région et qui, plus est, peut être alimentée en eau à partir de ces "crachées" de cailloux.

En se retirant définitivement le glacier a laissé sur toute la région des moraines graveleuses appelées par certains, moraines de retrait.

- Enfin le Rhône en reprenant son cours normal a permis l'établissement de terrasses dont les plus nettes sont celles de "La Platière" (terrasses postglaciaires érodant les formations antérieures) jouant à l'heure actuelle le rôle de massif stabilisant et drainant.

Quant à l'intervention humaine, elle a vraisemblablement contribué à la réactivation de glissements localisés; les travaux de rectification de virages ou d'élargissement de la plate-forme se soldent toujours par des désordres de surface importants mais localisés. La mise en eau de la retenue de Génissiat, a certainement perturbé les écoulements dans la couche de gravier inférieure, perturbations dont nous ne connaissons pas l'importance exacte.

II°, F - CONCLUSIONS.

L'étude du site permet d'arriver à quelques conclusions utiles par la suite à la description précise et à la compréhension des mécanismes du glissement de Léaz.

1°) Du point de vue géométrique, nous retiendrons :

- qu'un volume de terrains de couverture repose sur un substratum molassique susceptible de servir de "glissoir" du fait du comportement de certains niveaux argileux vis à vis de l'eau ;
- qu'à l'intérieur de ces terrains de recouvrement, il existe un niveau d'épaisseur variable, extrêmement dangereux, constitué d'argile capable de solifluer dès qu'elle est soumise aux agents atmosphériques;
- que ce volume contient ou supporte des graviers fournissant les apports d'eau nécessaires au ramollissement de l'argile ;
- que les circulations d'eau, quoique souvent très diffuses, sont abondantes et que celles-ci peuvent contaminer l'argile et humidifier des surfaces de glissement éventuelles.

2°) Du point de vue nature des matériaux, l'argile grise ainsi que certains niveaux de marnes contiennent des pourcentages plus ou moins importants de montmorillonite qui est un des minéraux argileux les plus nocifs. En outre, ces matériaux ont des propriétés mécaniques assez défavorables : cohésion moyenne, peu ou pas de frottement interne et surtout des limites de plasticité et de liquidité basses.

III°, - DESCRIPTION PRECISE DU GLISSEMENT.

III°, A - LOCALISATION DU GLISSEMENT.

Le glissement dit de Léaz se situe sur la rive droite du Rhône, dans les pentes s'étendant entre le village du même nom et la branche nord-sud du "méandre" du fleuve.

Les coordonnées d'un point central du glissement, calculées sur la carte topographique au 1/20 000 Saint-Julien en Génevois n° 6 sont :

Y = 127,800 - X = 874,600 - Z = 420,000

L'instabilité affecte essentiellement le pied du versant rive droite et ce, en-dessous de l'altitude dominante 500 m représentée par la route nationale n° 84 Lyon-Genève.

III°, B - GEOMETRIE DU VOLUME EN GLISSEMENT.

III°, B - 1 - Géométrie externe.

Le glissement se présente en plan sous la forme d'un triangle limité naturellement, à son sommet par le plateau de Léaz,

- à sa base, par le Rhône sur une longueur de 700 m,
- sur son côté nord par les "Roches de Léaz" sur environ 500 m,
- sur son côté sud, par une petite crête de graviers supportant le chemin rural d'Orge Combe représentant l'arrachement principal d'un glissement ancien) et par les terrasses de "La Platière", ceci sur une longueur totale d'environ 1000 m.

La superficie totale en mouvement ou susceptible de mouvements est d'environ 21 hectares dont 5 à 6 sont en prairies et le reste en taillis et bois.

La zone totale instable débute à la cote 480-470 (sommet nord du triangle) pour se terminer au niveau 370 d'où partent des coulées argileuses superficielles atteignant le retenue de Génissiat (cote 330) et s'y diluant.

III°, B - 1-1 - Forme générale de la surface topographique et valeurs des pentes de cette surface.

Les mouvements successifs ont laissé des empreintes très nettes. La surface du sol est "bosselée" et présente à l'heure actuelle les successions typiques de bourrelets et replats, puis viennent les "arrachements actifs", les fissures et crevasses à partir de la cote 420.

A partir du bord du plateau de Léaz, nous pouvons dénombrer 5 zones de bourrelets ou ruptures de pente, dont trois sont nettement visibles dans les prairies du lieu-dit "La Combe" et "Pré-Jacquet", les deux derniers étant moins nets du fait de la végétation de taillis et d'une activité intense les démantelant petit à petit. Ces bourrelets se succèdent régulièrement en arc de cercle concentrique et témoignent d'autant d'affaissements successifs du terrain ; ceci est très visible sur les photos prises en 1947 (fig. 78) où l'on voit les crevasses en fin d'évolution.

Ils n'ont pas une surface régulière, et se divisent souvent en une série de petits gradins témoins de mouvements rétrogrades de la crevasse d'arrachement.

+ A l'heure actuelle, les bourrelets N° 1 - 2 - 3 ont un profil convexe aplati vers le sommet et ne laissent pas présager dans les conditions actuelles une évolution catastrophique imminente. Cette évolution sera prévisible dès que le bourrelet prendra un profil concave vertical et présentera des crevasses d'arrachement (nous avons observé cependant au mois de mai 1967, l'apparition de fissures locales peu ouvertes (8 à 10 cm), peu profondes, et peu nombreuses sur les bourrelets N° 2 et N° 3).

Ils ont des pentes moyennes de 25 à 30° et leur hauteur varie de 5 à 8 m. Ils s'amortissent et disparaissent au contact des éboulis des "Roches de Léaz" et se raccordent tous à la niche d'arrachement ancienne que constitue le chemin d'Orge Combe. Ils forment ce que nous appellerons zone de solifluxion relativement calme ou zone de "l'ancien glissement". Il ne faut pas perdre de vue cependant que des déplacements notables y ont été enregistrés.

+ Les bourrelets N° 4 et N° 5 avec leur replat correspondant dont le plus net est celui de la cote 380 ne présentent plus le profil convexe décrit plus haut ; nous entrons là dans le domaine de la solifluxion active. Ils évoluent en arrachements concaves de hauteur variant de 1 à 5 m. La première crevasse importante débute à 5 m en contrebas du sondage S.M. 2.

+ Enfin à partir de la cote 380, le versant plonge vers la retenue avec une pente naturelle de 25 à 30° et se trouve affecté de mouvements de coulée très actifs sur une épaisseur d'environ 3 à 5 m, dus à la fois aux déplacements des terres et à une érosion régressive très intense s'accroissant les jours de pluie. Nous appellerons cette zone : zone de solifluxion très active, à coulées.

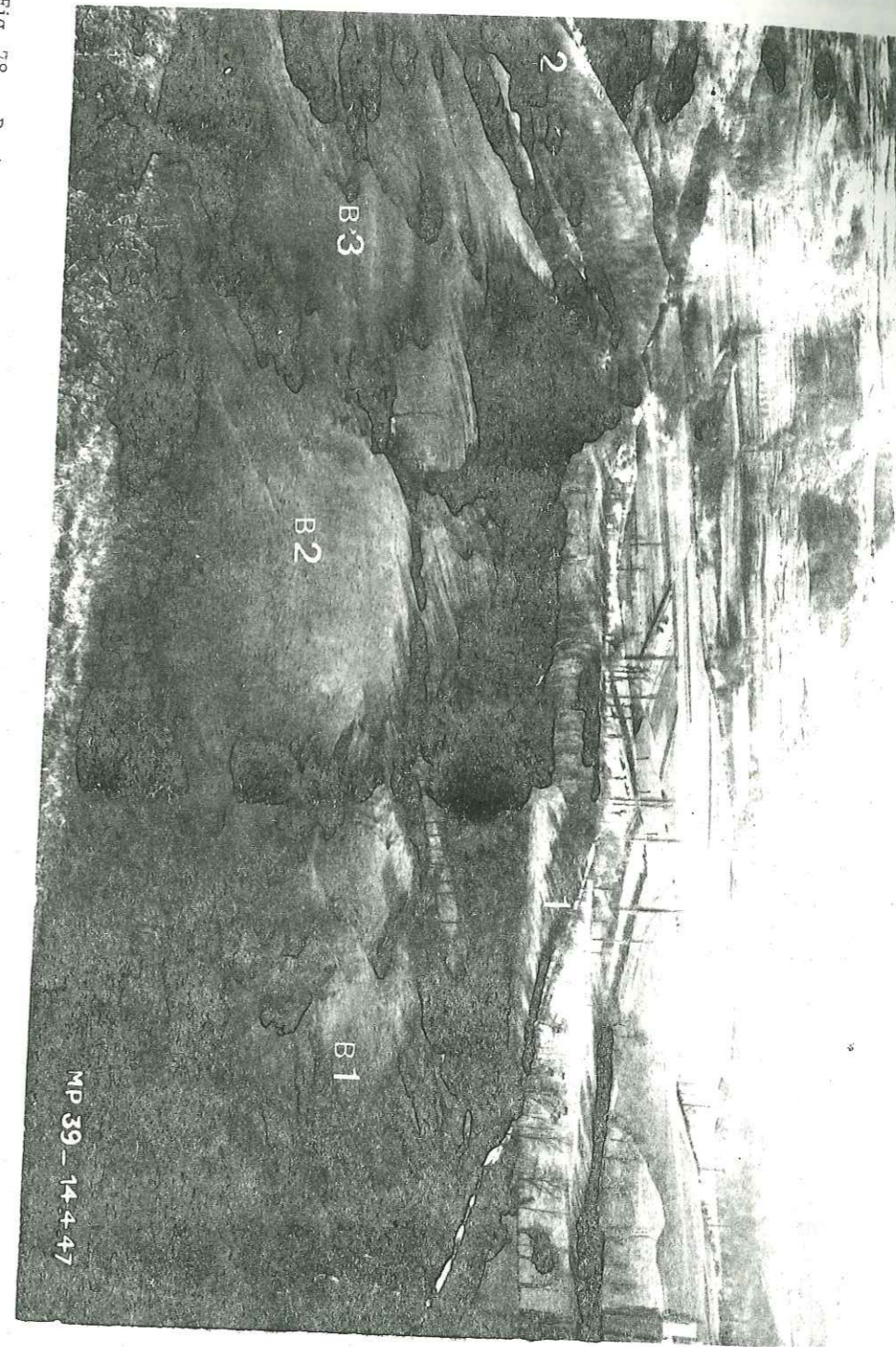
III°, B - 1-2 - Intégration de cette forme générale à l'ensemble du glissement.

Les zones de bourrelets visibles suivant une ligne de plus grande pente reliant S.M. 5 à S.M. 4 s'amortissent considérablement vers la partie droite du glissement (en regardant dans le sens général de mouvement) et font place à une succession régulière d'arrachements très actifs hauts de 1 à 3 m en moyenne, disposés en gradins le long de la pente, jusque vers la cote 390. Ces arrachements visibles sur de nombreuses photos même anciennes donnent lieu à de petites coulées.

Le glissement peut donc être divisé d'après les observations de surface en quatre zones principales :

- une zone de solifluxion à bourrelets non déchirés représentant le secteur relativement calme, partie supérieure gauche. (A)
- une zone de solifluxion à déchirures, active, partie moyenne (B) ;
- une zone de coulées et de solifluxion à déchirure très active, partie inférieure droite et gauche (C) ;
- une zone de solifluxion en terrasses, partie supérieure et moyenne droite (D).

Fig 78 - Partie supérieure du glissement de Léaz au 14-4-1947 (Photo C N R) - 1 chemin d'Orge Combe
2 : Le Rhône - retenue de Génissiat B1, B2, B3 : bourrelet n° 1, n° 2, n° 3



III°, B - 1-3 - Formes particulières : fissures et crevasses.

D'après la légende de la figure n° 79, nous réservons le terme de fissure à des déchirements superficiels dont les lèvres sont peu écartées (10 cm) et celui de crevasse à des fissures ayant évoluées en cisaillement, et à lèvres décalées verticalement, ou devenues béantes par suite des mouvements. La zone des fissures et crevasses actives débute aux environs des lignes de témoins topographiques E₁, D₁, D₂ et E₁, D₁, E.
Nous en distinguerons deux sortes :

a) Les fissures et crevasses transversales à la direction de mouvement. Elles sont orientées sensiblement Nord Sud et représentent la majeure partie des indices de glissement ; parmi celles-ci (fig. 80) :

+ certaines sont disposées plus ou moins régulièrement en arc de cercle et se propagent vers l'amont. Elles sont relativement régulières, peu profondes (1 à 2 m) et évoluent rapidement en crevasses d'arrachement par effondrement de la masse aval par rapport à celle amont après s'être ouvertes de 20 à 30 cm ; ce processus indique un mouvement superficiel. Le décalage moyen entre les deux bords de la crevasse est de 1 à 1,50 m. Un exemple de ce type est visible entre les bornes 23 et 26.

+ d'autres sont mal hiérarchisées et aboutissent à la formation d'un réseau très irrégulier de fissures se recoupant entre elles. Prises individuellement, elles intéressent une masse de terrain moins importante, mais contribuent dans leur ensemble à morceler à l'extrême le secteur qu'elles affectent. Leur profondeur moyenne est de 0,80 m à 1 m pour une ouverture de 10 à 20 cm. Certaines d'entre elles évoluent aussi en crevasses d'arrachement présentant des décalages de 30 à 50 cm. Lors de mouvements de grande amplitude, on peut enregistrer des décalages de 1 à 2 m. Ce genre de fissures se rencontrent principalement dans le secteur des bornes 28, 21, 37, 38, qui est le plus actif.

+ certaines fissures transversales sont rectilignes et ont évolué rapidement en arrachements se succédant régulièrement dans la pente et libérant ainsi des langues argileuses. Le décalage varie entre 0,5 et 3,00 m et la pente de la paroi de l'arrachement est de 20°. Ces formes en gradin se retrouvent surtout dans la partie droite (D) du glissement dont nous avons déjà parlé, c'est-à-dire entre la borne C 1 et les bornes 28, 36, 34, 30.

+ d'autres enfin évoluent très rapidement en arrachements hauts de 2 à 5 m à pente concave (20°), prenant la forme d'arc de cercle. Ces arrachements libèrent des coulées argileuses ravinant les berges du Rhône. Nous pouvons ainsi observer 5 grandes niches d'arrachement larges de 30 à 50 m séparées encore à l'heure actuelle par des crêtes plus stables. Sous l'effet conjugué de l'érosion régressive et du mouvement général du glissement, les crevasses reculent et entament considérablement le replat de la cote 380 à la faveur d'un système de crevasses et fissures inextricables, difficile à cartographier. En outre, ce réseau évolue vers la fusion en une seule grande niche d'arrachement englobant les 5 ravins décrits ci-dessus.

b) Les fissures et crevasses longitudinales, (fig. 81) de direction nord ouest - sud est sont peu nombreuses. La plus visible et la plus longue est celle joignant le secteur actif de la B.K. 176 à la borne 38 où elle est relayée par d'autres fissures. Le décalage vertical est de 80 cm en moyenne avec affaissement du compartiment de droite. Horizontalement elle contribue à décaler un sentier d'une dizaine de mètres. Ces fissures longitudinales sont très dangereuses car elles délimitent des volumes importants de matériaux instables.

III°, B - 2 - Géométrie interne actuelle.

III°, B - 2-1 - Volumes lithologiques - Limites.

Une campagne de sondages mécaniques et électriques est venue compléter et éclairer les observations de surface imprécises du fait de l'activité importante de la couche argileuse superficielle.

La succession moyenne admise dans l'étude du site : gravier supérieur - argile grise - gravier inférieur - substratum, n'est pas continue dans toute la zone du glissement, du fait des mouvements anciens. On trouve successivement de haut en bas et d'une façon assez générale (voir tableau 41 et fig. 82, 83, 84).

a) Un volume argileux qui peut revêtir deux formes différentes vis à vis du glissement.

- un simple recouvrement peu épais d'argile grise ou beige avec quelques graviers, l'épaisseur variant entre 2 et 4 m. Sa présence est décelable dans les sondages S.M. 4 - S.M. 3 - S.E. e3 - S.E. e2 - S.E. d2. Cette argile de recouvrement est affectée de mouvements de solifluxion importants.

MORPHOLOGIE DU GLISSEMENT DE LÉAZ

Valable 1^{er} semestre 1967

LÉGENDE	
	Fissure
	Crevasse
	Niche d'arrachement active
	Niche ancienne
	Bourrelet - rupture de pente
	Bourrelet N°1

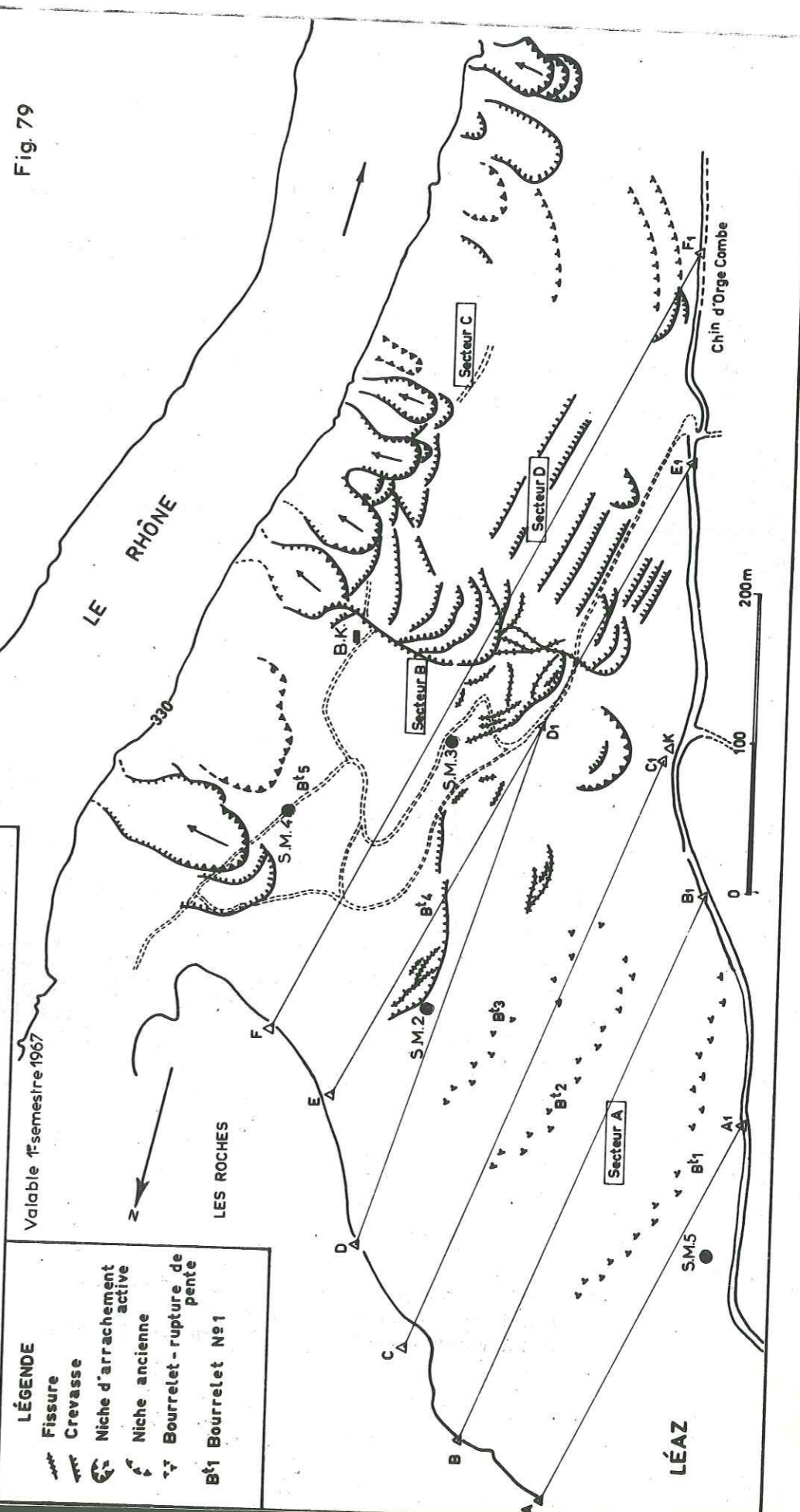




Fig. 80



Fig. 81

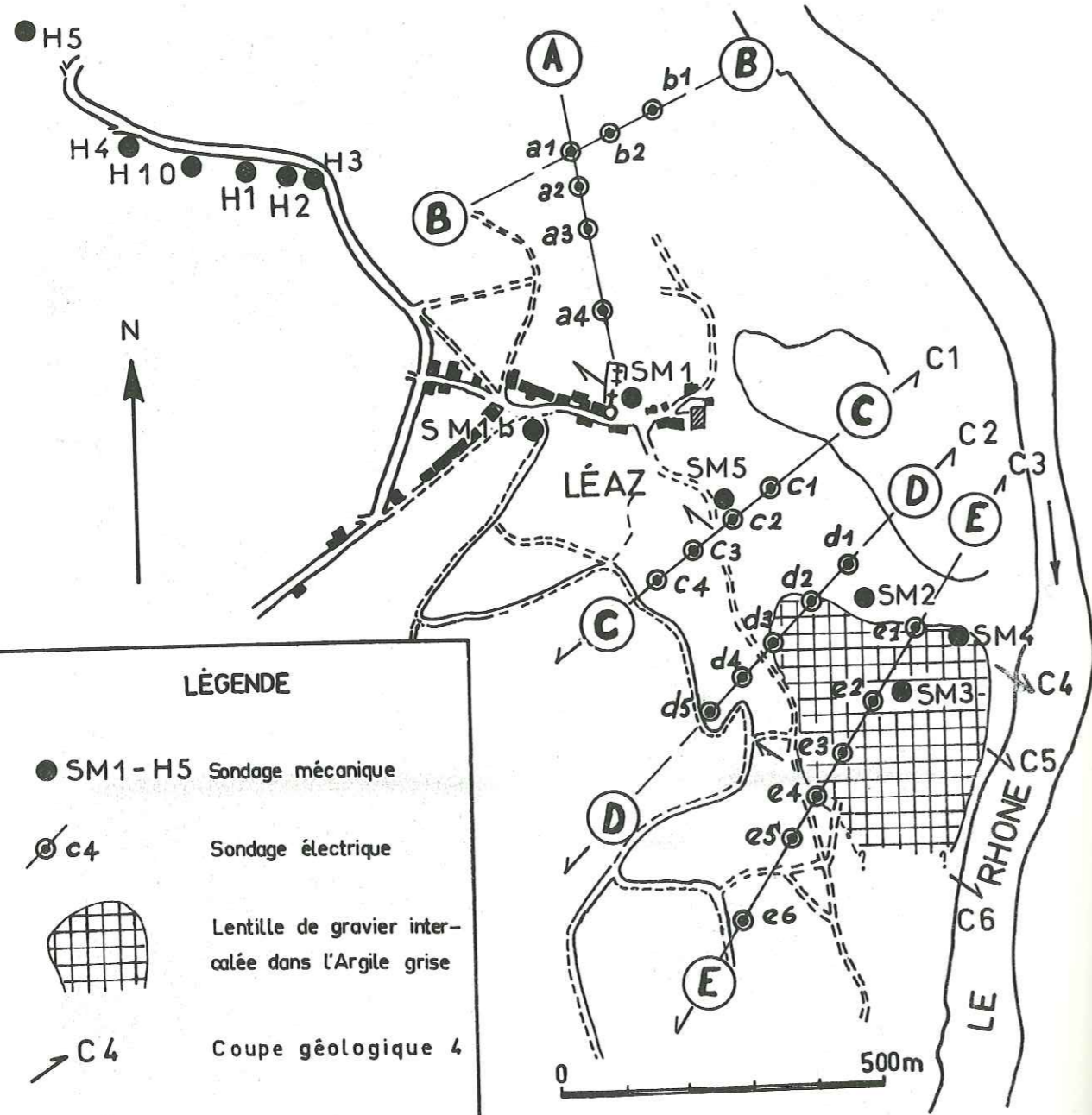
Fig. 80 - 81 - Types principaux de fissures et crevasses dans le glissement de Léaz.
 (80) fissures et crevasses transversales
 (81) fissure longitudinale (replat 380) ayant décalé le chemin de 10 m environ en 20 ans.



Glissement de Léaz - Vues frontales - coulées dans la berge rive droite du Rhône.

GLISSEMENT de LÉAZ

Implantation des sondages mécaniques et électriques.



LÉGENDE

- SM1 - H5 Sondage mécanique
- ⊙ c4 Sondage électrique
- Lentille de gravier intercalée dans l'Argile grise
- C4 Coupe géologique 4

TABLEAU N° 41 - ÉPAISSEUR ET COTE DES DIFFÉRENTS VOLUMES DE MATÉRIAUX (en mètre) GLISSEMENT DE LÉAZ

N° du Sondage	Cote du Sondage	Épaisseur volume argileux (2)	Cote mur de l'argile grise	Épaisseur volume graviers sup.	Cote mur lentille de graviers	Épaisseur volume graviers inf.	Cote du substratum	Épaisseur totale des terrains de couverture	Épaisseur volumique en mouvement (1)	OBSERVATIONS
S.M.1	497,72	-	-	sup. à 31 m	-	-	?	sup. à 31 m	stable	PLATEAU DE LÉAZ
S.M.1 bis	497,69	-	-	sup. à 45 m	-	-	?	sup. à 45 m	stable	
S.M.2	416,32	22,60	393,72	-	-	-	393,72	28,00	13,50	
S.M.3	400,09	3,10 + 20	367,94	8,00	388,19	sup. à 8,00	367,94	sup. à 40 m	12,35	
S.M.4	381,68	1,80 + 4,90	367,18	7,80	372,08	8,50	367,18	30,45	14,00	
S.M.5	464,50	23,10	441,40	-	-	11,65	441,10	34,75	?	
SE a1	460,00	18,00	441,00	-	-	-	441,00	18,00	-	SUBST. = calcaire
SE a2	478,00	12,00	468,00	-	-	-	468,00	12,00	-	SUBST. = "
SE a3	504,00	7,00	496,00	-	-	-	496,00	7,00	-	SUBST. = "
SE a4	504,00	5,00	-	-	-	-	-	sup. à 31 m	-	
SE b1	465,00	-	460,00	6,00	-	-	460,00	6,00	stable	
SE b2	465,00	11,00	450,00	4,00	-	-	450,00	15,00	"	
SE c1	450,00	25,00	425,00	-	-	-	415,00 ?	35,00		
SE c2	464,00	22,00	441,00	-	-	10,00	429,00 ?	34,75		
SE c3	468,00	32,00	436,00	-	-	11,65	423,00 ?	44,00		
SE c4	465,00	9 + 18,00	438,00	-	-	13,00	425,00 ?	40,00		
SE d1	425,00	27,00	397,00	-	-	-	382,00 ?	-	13,00	
SE d2	425,00	1,00 + 30,00	392,00	2,00	422,00	-	382,00 ?	-	5,00	
SE d3	440,00	8,00 + 20,00	408,00	4,00	428,00	17,00	382,00 ?	40,00 ?	12,00	
SE d4	445,00	6,50	436,00	-	-	sup. à 25,00	-	?	stable	
SE d5	445,00	7,50	436,00	-	-	sup. à 25,00	-	?	stable	
SE e1	398,00	1,50 + 25,00	368,00	2,00	394,00	-	?	?	4,00	
SE e2	405,00	1,50 + 20,00	373,00	10,00	393,00	-	?	?	12,00	
SE e3	413,00	4,50 + 14,00	379,00	13,00	395,00	-	?	?	17,50	
SE e4	428,00	40,00	384,00	4,00	424,00	-	?	?	stable	
SE e5	412,00	46,00	365,00	-	-	-	?	?	stable	
SE e6	400,00	-	-	15,00	-	-	?	?	stable	LA "PLATIERE"

(1) ESTIMATION FONDÉE SUR LES MESURES DE DÉFORMATION DES TUBES PLASTIQUES ET SUR LES DONNÉES DE LA GÉOPHYSIQUE

(2) POUR LE VOLUME ARGILEUX, LES DEUX CHIFFRES CORRESPONDENT RESPECTIVEMENT À L'ARGILE GRISE DE RECouvreMENT DE LA LENTILLE DE GRAVIERS ET À L'ARGILE GRISE SUPPORTANT CETTE MÊME LENTILLE.

- il peut constituer aussi la véritable couche d'argile grise glacio-lacustre rencontrée en différents points des environs de Léaz. L'épaisseur de la couche varie entre 5 m et 30 m (voir tableau n° 41). On la rencontre des deux côtés et sous le chemin d'Orge Combe où elle augmente d'épaisseur ; l'épaisseur maximum rencontrée étant de 45 m au S.E. e5 situé en-dehors du glissement vers "La Platière". Elle est présente aussi au Nord de Léaz suivant les profils électriques A et B.

L'argile grise repose sur une surface inclinée en moyenne de 10° à 12° selon une direction nord ouest - sud est ; localement la surface de contact graviers inférieurs - argile grise peut prendre la forme d'un talweg à pente plus forte et axé parallèlement au "Roches de Léaz".

De plus l'argile grise montre nettement en son sein un talweg orienté nord ouest - sud est, c'est-à-dire dans l'axe de mouvement maximum ; ceci est visible au profil électrique E.

b) Un premier volume graveleux = "couche de graviers supérieure",

Il constitue une grande lentille de graviers à l'intérieur d'une masse essentiellement argileuse. Elle est épaisse de 4 à 15 m et a été reconnue sur au moins la moitié de la surface totale du glissement ; il est probable qu'il existe des prolongements vers la pointe sud du triangle.

Sa constitution est variable : ce sont, tantôt des graviers sableux à dominante calcaire et des blocs calcaires anguleux pouvant se mélanger à des éboulis des "Roches de Léaz", tantôt des galets (surtout vers "La Platière"), mais nous manquons de données profondes pour vérifier cette dernière hypothèse.

Ces graviers sont sans doute assez colmatés par endroit, aucune perte d'eau n'ayant été signalée dans certains sondages mécaniques en particulier au S.M. 3. Les blocs peuvent être enrobés d'argile comme l'a montré le sondage S.M. 4.

c) Un deuxième volume graveleux situé sous l'argile grise = "couche de graviers inférieure".

Il est constitué de galets, graviers sableux plus rarement argileux, et de conglomérats (non rencontrés en sondage) et contient un niveau aquifère localement en charge (S.M. 3). Ils peuvent être très perméables comme le montrent les pertes totales d'eau et de boue au S.M. 4.

Cette couche de graviers forme un point haut dans l'axe du chemin d'Orge Combe et un talweg dans la zone du glissement. Ceci élimine l'hypothèse d'une faille quaternaire longeant le chemin, et constitue un élément stabilisant relayé par la terrasse de "La Platière". Par contre l'existence d'un talweg dans la zone du glissement est un élément défavorable à la stabilité de la couche argileuse sus-jacente surtout en présence d'eau.

Ce volume de graviers peut être absent localement (S.M. 2).

d) Le substratum.

Constitué de molasse et de marnes, il n'a pas été atteint partout. Trois sondages S.M.2 - S.M.4 - S.M.5 ont rencontré des marnes bigarrées ou grises, très froissées et portant des traces de cisaillement. Les sondages prévus pour 50 m ne nous ont pas permis de déterminer leur épaisseur ni leur position exacte par rapport aux autres termes lithologiques.

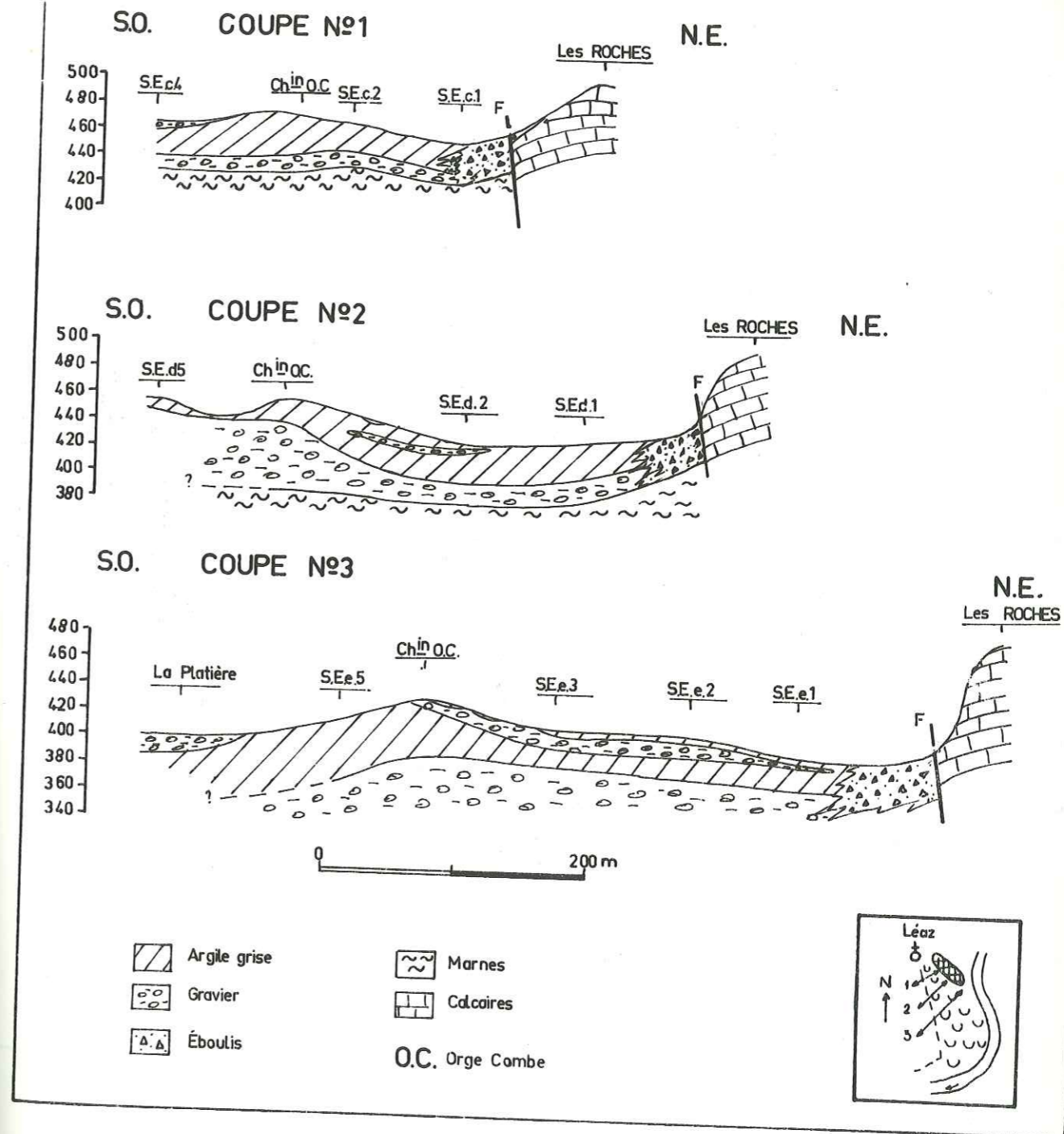
e) Les limites naturelles du glissement, se précisent donc comme suit :

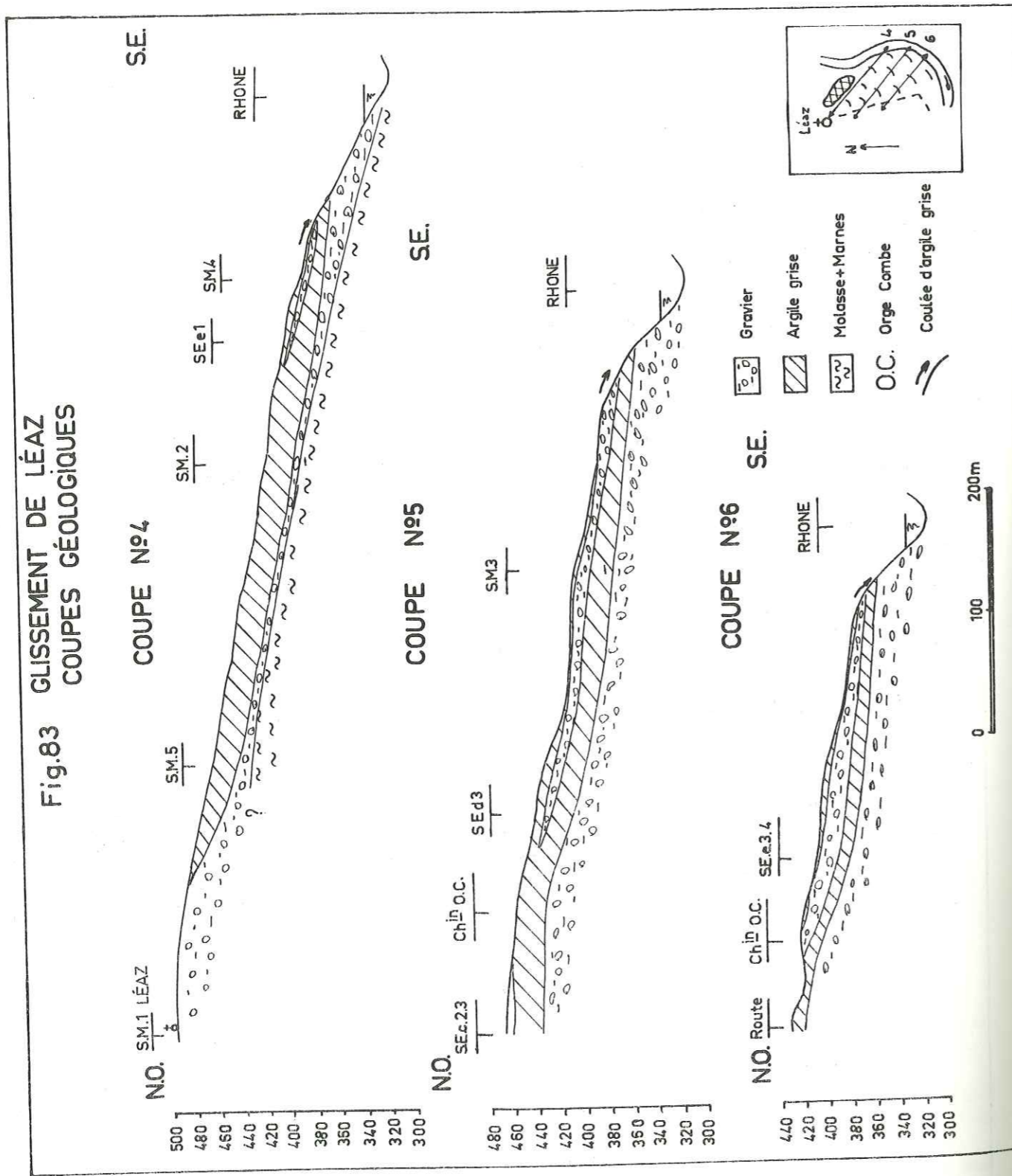
+ sur le côté nord du triangle, le glissement est limité par les "Roches de Léaz" et par un des satellites de ce massif, en l'occurrence le môle calcaire situé à faible profondeur sous le plateau de Léaz (partie nord) ; ces deux blocs (l'un visible - l'autre caché) sont en relation avec la faille (C) citée dans les paragraphes précédents.

+ sur le côté sud-ouest, un môle de gravier allongé dans l'axe du chemin d'Orge Combe joue le rôle de point dur et stable sur lequel se sont arrêtés les mouvements anciens (le chemin d'Orge Combe apparaît comme une ancienne niche d'arrachement).

Ces graviers sont relayés par une autre masse de graviers : celle de "La Platière" jouant le rôle de massif poids drainant et bloquant les pentes argileuses de la petite combe située au Sud du village. Ceci explique la disparité de comportement entre les deux compartiments : le compartiment est (entre le chemin d'Orge Combe et le Rhône) étant très instable et le compartiment ouest (côté ouest du chemin d'Orge Combe) restant stable. Cette donnée nous permet de penser que le glissement ne reculera pas, dans l'état actuel des choses, au-delà de cette limite.

Fig 82 GLISSEMENT DE LÉAZ
COUPES GÉOLOGIQUES





Tout ceci illustre ce que nous avons déjà avancé au chapitre de la géométrie du versant, à savoir : l'existence probable d'un lac sous ou périglaciaire ayant permis le dépôt de sédiments fins sur un fond de graviers très irrégulier, avec possibilité de glissement au stade même de la sédimentation et expliquant ainsi les variations d'épaisseurs importantes de la couche argileuse.

III°, B - 2-2 - Surfaces de glissement.

Nous distinguerons cinq hypothèses principales quant à l'existence de surface (s) de glissement délimitant des volumes instables d'importance variable.

III°, B - 2-2-1 - L'examen qualitatif (fissures - crevasses) quantitatif (vitesses de mouvement faibles bien que non négligeables) et des observations comparées effectuées sur d'autres zones instables (tournant de la Bonne Eau - Poterie de Vanchy), nous amènent à considérer d'abord deux types de surface de faiblesse.

a) Un type de surface située à faible profondeur, et nettement définie correspond à la zone de contact du toit de la lentille graveleuse avec l'argile de surface ou de recouvrement. Les apports d'eau superficiels ou souterrains permettent une solifluxion intense à griffures - déchirures - coups de cuillère que l'on contrôle topographiquement.

b) Un autre type moins bien défini est constitué en fait d'une série de surfaces élémentaires de glissement, les lentilles de sablons, les varves sableuses se comportant comme des zones de faible résistance et à perméabilité plus forte autorisant des déplacements différentiels sous forme de solifluxion. Les varves joueraient les uns par rapport aux autres, provoquant essentiellement un mouvement de translation sur une épaisseur moyenne de 5 m.

Ce type de déformation affecte la tranche superficielle de la couche d'argile grise au-delà des limites de la grande lentille de gravier, entre les S.E. c2 - c1 - d1 et S.M.2.

Ajoutons à ceci que la limite de plasticité peut être franchie par la teneur en eau, nous avons donc affaire à une solifluxion à bourrelets - déchirures, ces dernières impliquant des surfaces de faiblesse courbes et concaves.

III°, B - 2-2-2 - Le contrôle des tubes plastiques équipant les sondages mécaniques signale une déformation nette pour trois des tubes, vers les 12 à 14,50 m (tableau n°42). Ceci correspond au S.M. 3 sensiblement à la zone de contact lentille de gravier - argile grise. Cette surface de glissement contenue dans l'argile grise et alimentée en eau à partir des graviers doit vraisemblablement s'étendre à la moitié de la superficie du glissement. Quoique assez compliquée dans le détail, la forme générale de cette surface est très défavorable puisqu'elle dessine un talweg orienté Nord Ouest - Sud Est dans l'axe du mouvement maximum. La pente approximative varie de 20° vers le haut du glissement à 5° vers le replat 380 (la pente moyenne dominante étant de 7° à 10°). Au S.M. 4, cette surface de glissement passerait entre les deux couches de gravier (lentille et couche inférieure (1)).

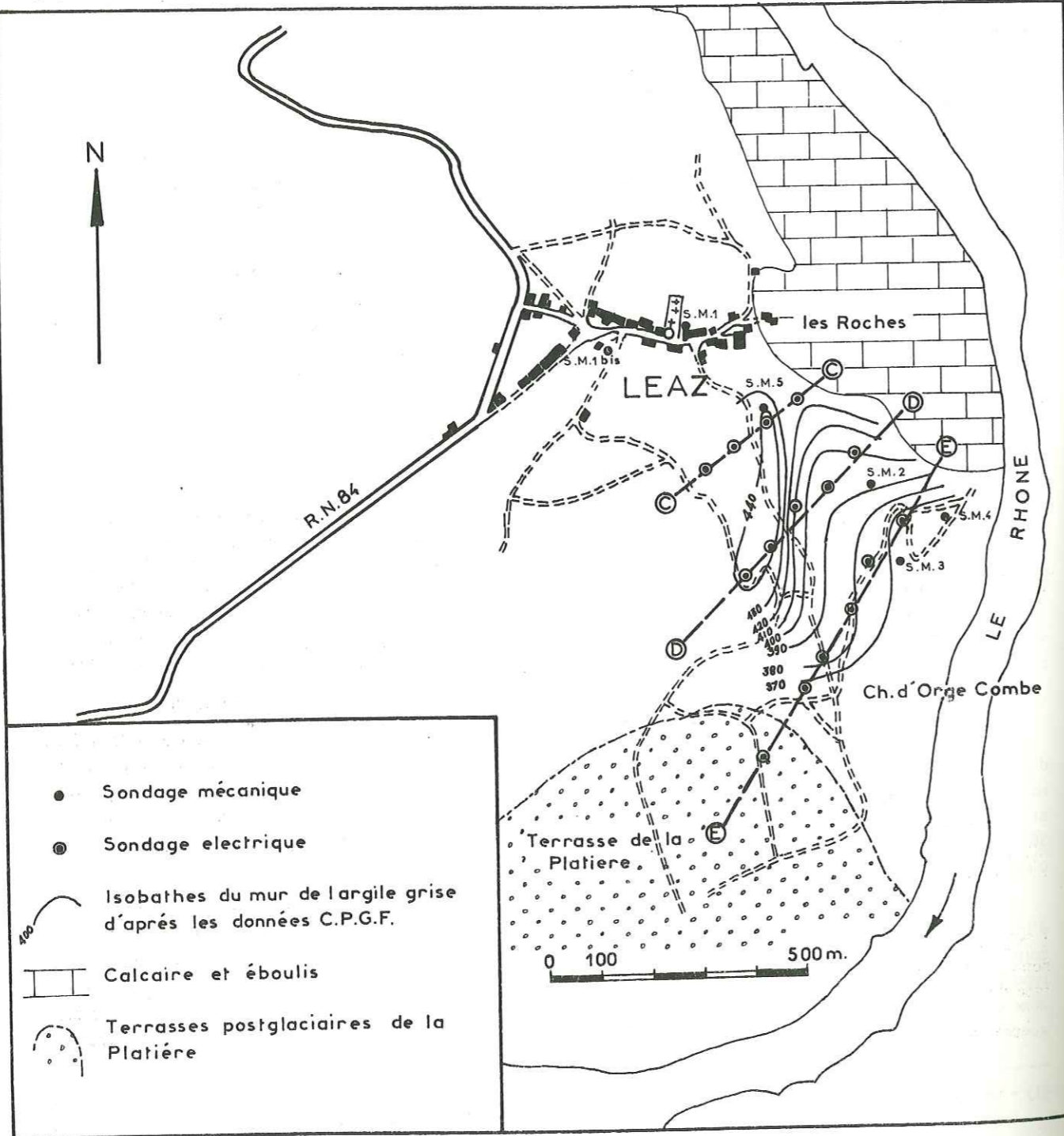
Le volume ainsi délimité (en grande partie fait de graviers) est de 1 000 000 m³ au minimum.

III°, B - 2-2-3 - Le replat de la cote 380 est caractérisé aussi par la présence de la surface de glissement définie ci-dessus. Toutefois, les crevasses ayant tendance à fusionner en une seule affectant tout le replat, on peut supposer une zone de faiblesse redressée et concave vers la cote 390 coupant la lentille de gravier et s'aplatissant ensuite en direction du Rhône. Cette surface délimite un volume instable et dangereux d'environ 360 000 m³, susceptible de doubler si l'on suppose l'extension de la crevasse unique à tout le front du glissement, c'est-à-dire des "Roches de Léaz" jusqu'à "La Platière".

III°, B - 2-2-4 - Dans le cadre d'une hypothèse plus pessimiste, les sondages permettent d'individualiser un volume de terrain apte à glisser et comprenant la totalité de la couche d'argile grise (1). La zone de contact argile-couche de graviers inférieure (légèrement en charge par endroit) peut constituer un quatrième type de surface de glissement possible, située en moyenne à 20 - 25 m de profondeur, et ce, d'autant plus que cette zone de contact est inclinée vers le Rhône de 10 à 12°. Elle se relève aux abords du chemin d'Orge Combe où elle accuse, d'après les données de la géophysique une pente moyenne de 25° à 30°. Le chemin représente d'ailleurs

(1) - Ne connaissant pas la déformée exacte des tubes (en raison du système de calibre adopté), nous ne pouvons dire si à 12 - 14,50 m, il y a rupture du tube, indiquant un mouvement de translation de la lentille de gravier ou si, au contraire, il existe une déformation continue vers les plus grandes profondeurs, c'est-à-dire vers la couche de graviers inférieure.

Fig.84 ISOBATHES DU MUR DE L'ARGILE GRISE hypothèse pessimiste de surface de glissement.



vraisemblablement la zone de départ d'un ou plusieurs glissements anciens relativement profonds par rapport à ce que nous pouvons voir actuellement.

Cette hypothèse pessimiste non mise en évidence, jusqu'à maintenant, par des déformations en sondage doit cependant retenir l'attention et être considérée comme possible. Elle se solderait par le glissement d'une tranche de terrain de 20 m d'épaisseur en moyenne, soit environ 4 000 000 m³ d'argile et de graviers.

III°, B - 2-2-5 - Une cinquième hypothèse enfin peut être prise en considération bien que nous n'ayons aucune confirmation par les contrôles de déformation en sondage (le système adopté ne permettant pas une fois la déformation des 14 m déclenchée, de tester d'une façon sensible le reste de la colonne plastique) ni par l'observation de surface (le contrôle topographique et l'analyse des formes de la berge du Rhône ne montrant pas de renflement typique de la "couche de gravier inférieure").

On peut concevoir en effet, soit un glissement sur le substratum molassique ou marneux, soit un glissement dans les marnes elles-mêmes. Cette hypothèse repose sur l'examen du carottage effectué dans ces marnes bigarrées dont nous avons déjà dit qu'elles étaient très froissées et portaient des traces de cisaillement nettes non dues à l'outil de forage (fig. 85). Cet état de fissuration peut constituer un ensemble de zones de faiblesse supportant une épaisseur de terrain minimum de 35 m soit un cube de 7 350 000 m³.

III°, B - 2-3 - Façon de glisser des matériaux.

Les matériaux peuvent donc se fracturer et glisser de façons différentes suivant les endroits.

III°, B - 2-3-1 - Il y a d'abord un mouvement de solifluxion généralisée enregistré par les témoins topographiques de surface. Ce mouvement est lent mais évolue inexorablement vers l'enlèvement progressif de plaques d'argile qui reprises sous forme de coulées vont se dissoudre dans le Rhône (la limite de liquidité étant assez basse). Ce type de mouvement bien que spectaculaire dans le détail n'est pas dangereux à court terme. Actuellement, au cours de cycles d'activations on peut observer :

- a) des déformations plastiques sans rupture brutale, dans la zone des bourrelets N° 1 - 2 et 3 ;
- b) des cisaillements et affaissements plus ou moins rapides de masses bien délimitées et d'importance assez réduite dans la zone du bourrelet N° 3 ;
- c) au centre du glissement dans le secteur très actif des déchirures superficielles dont l'enchevêtrement contribue à disloquer complètement cette zone sur une épaisseur moyenne de 3 à 4 m. L'ouverture des fissures permet des infiltrations plus importantes, et la solifluxion évolue ainsi vers le mécanisme de coulée superficielle surtout si la lentille de gravier est susceptible de fournir des apports d'eau supplémentaires ;
- d) un mouvement de glissement par paquets successifs évoluant très rapidement en coulées argileuses. Le phénomène de décollement par paquet tout en étant superficiel ici, peut mettre en jeu des volumes importants comme le montrent les affaissements d'argile grise le long de la R.N. 84, dans le tournant de la Bonne Eau ;
- e) un mouvement de coulée et de décollement de plaques d'argile sur les berges même du Rhône.

III°, B - 2-3-2 - Ces mouvements relativement superficiels cachent, en fait, un autre type de glissement beaucoup plus grave de conséquences si la rupture intervient brusquement. Il s'agit du mouvement de la lentille de gravier sur son coussinet d'argile molle, facilité de surcroît par la fréquence d'un talweg enterré. L'axe de ce talweg correspond aux déplacements les plus importants enregistrés en surface, secteur des bornes 36-37-38-39-35 - 27-28-29. Actuellement le mouvement est très lent (malgré l'aspect spectaculaire du replat 380), il peut correspondre à la phase préparatoire du glissement. Il nous est impossible de prévoir la date de la rupture et de dire si le glissement aura lieu d'un seul coup provoquant la chute de 1 000 000 m³ dans la retenue. Par contre le volume individualisé sur les bords du Rhône est en position instable critique et la rupture risque d'intervenir brutalement, la surveillance des témoins implantés dans les berges mêmes de la retenue devra donc être très régulière.

III°, B - 2-4 - Conclusions à l'étude de la géométrie des volumes en glissement.

- On peut penser raisonnablement que le glissement se limitera à la zone triangulaire définie ci-dessus et ne s'étendra pas au plateau de Léaz ni aux pentes sud du village, de l'autre côté du chemin d'Orge Combe. Les mesures de contrôle des bases de départ A₁ - B₁ - C₁ - K - D₁ - E₁ - F₁ confirment la stabilité du chemin.
- Les mouvements spectaculaires de surface, de par leur nature même (solifluxion en terrain argileux) n'évoluent pas vers une issue catastrophique avec libération d'une masse importante de matériaux. Le secteur le plus actif

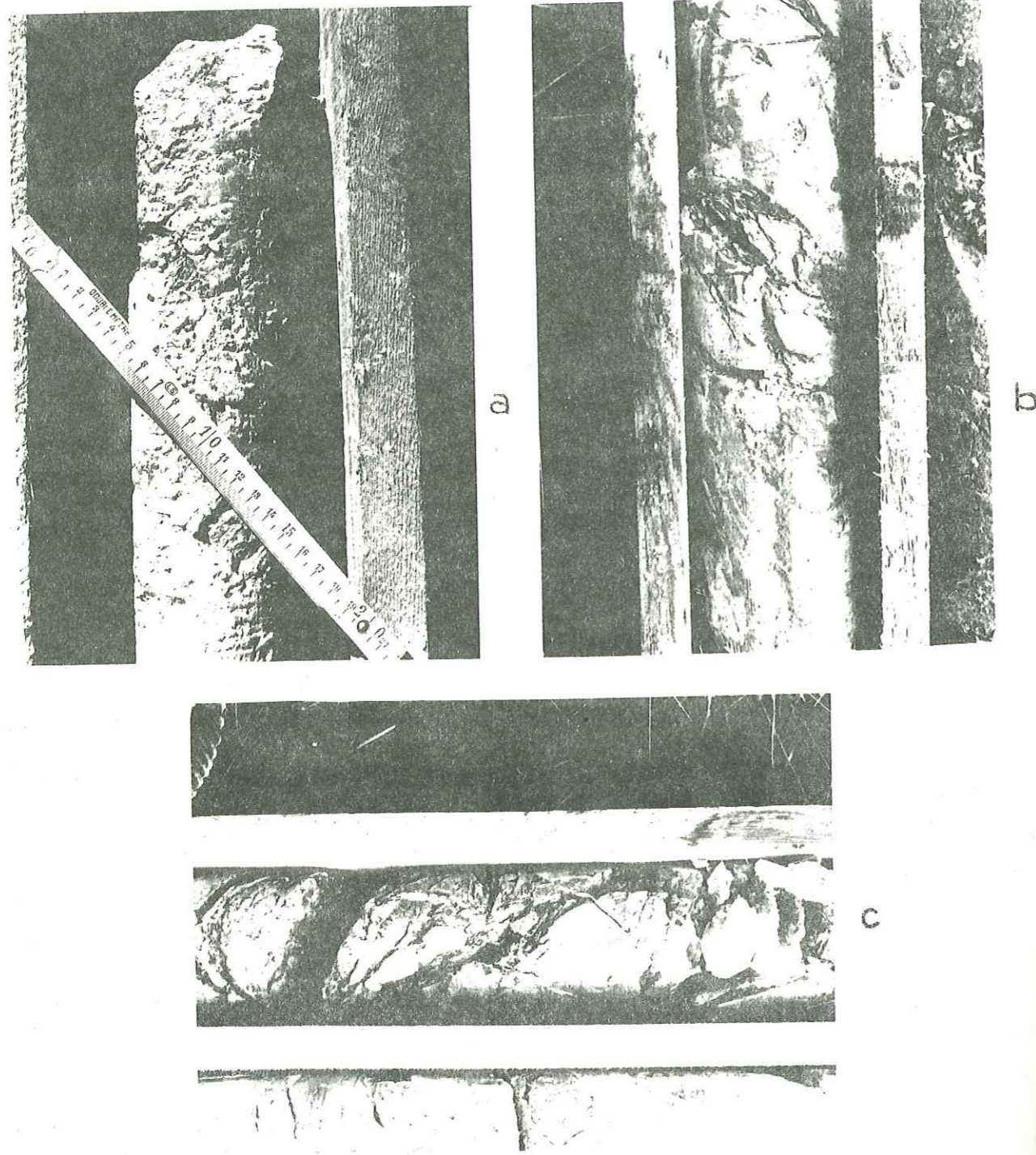


Fig 85a-b-c- Etat de fracturation des marnes bigarrées prélevées dans les sondages S. M. 2 et S. M 4 (85 a-b) ; traces de cisaillement non dues à l'outil de forage.

c'est-à-dire celui du replat 380 et des coulées, est susceptible de fournir un apport plus important de matériaux argileux, mais ces derniers étant donné la nature de l'argile se mettront en suspension au contact de l'eau et seront en partie entraînés par le courant. Il n'y a pas de risque d'envasement complet et rapide de la retenue.

- Les trois hypothèses les plus dangereuses et les plus vraisemblables sont :
 - + une lentille de gravier soumise à des glissements lents, et ayant un volume de 1 000 000 m³ au minimum, susceptible de barrer la retenue lors de la rupture finale ;
 - + un volume gravier plus argile grise estimé à 4 000 000 m³ dont une partie (argile) pourrait se dissoudre dans le Rhône et l'autre faire barrage ;
 - + un volume très nettement délimité, à la cote 390 - 380, par la fusion de fissures et crevasses en une seule, dont les mouvements se résument à des coulées superficielles facilitées grandement par l'érosion régressive et à des décollements de plaques d'argile épaisses de 1 à 2 m. Ce volume peut être considéré comme dans un état critique. Le cube de matériaux instables (graviers plus argile) a été estimé à 360 000 m³ dans un premier stade, avec probabilité d'extension vers La Platière.

III°, C - TRANSFORMATIONS DES MATERIAUX ET DE LA GEOMETRIE AU COURS DU GLISSEMENT.

- a) La couche superficielle d'argile, soumise aux agents atmosphériques (pluies - brouillard - neige - sécheresse) se disloque, se ramollit et tend à libérer des petites coulées. Une fois dégagée de sa couverture végétale, elle s'altère en une argile de couleur beige.
- b) Dans les secteurs très actifs, l'argile perd sa structure varvée.
- c) De plus, on sait que d'une façon générale, les propriétés mécaniques d'une argile deviennent de plus en plus mauvaises au fur et à mesure des mouvements.
- d) Les poches ou lentilles de sablon, une fois entaillées, se vident pour donner au bas des talus, des sortes de cônes de déjection très plats recouvrant ou se mélangeant avec les autres matériaux glissés.
- e) Les mouvements contribuent au mélange et au brassage des divers faciès occasionnant ainsi des variations brusques du coefficient de perméabilité.

III°, D - COMPORTEMENT HYDROGEOLOGIQUE PROPRE AU GLISSEMENT (1).

Le bassin versant topographique immédiat du glissement de Léaz est très réduit. Aucun cours d'eau naturel ne l'emprunte, hormis des écoulements de sources prenant naissance dans le glissement lui-même ; un petit canal collecteur des eaux de source du plateau de Léaz et des écoulements du village le traverse à son extrémité sud. Les photos aériennes (infrarouges) révèlent un secteur à forte humidité se traduisant par des tons gris devenant de plus en plus foncés à mesure que l'on se dirige vers le Rhône. Ces mêmes photos infrarouges semblent indiquer une alimentation en provenance des calcaires des "Roches de Léaz" et de la crête graveleuse du chemin d'Orge Combe. Nous allons donc passer en revue les principaux apports d'eau à l'intérieur de la zone de glissement.

III°, D - 1 - Les sources.

Les sources sont relativement nombreuses et d'origine superficielle, leur débit augmentant rapidement avec les chutes de pluie. Les émergences se trouvent à des cotes diverses accompagnant les fissures et crevasses du glissement. L'eau sourd aussi à la faveur de zones plus perméables (gravier, sablon).

On peut distinguer approximativement trois secteurs à émergences nombreuses.

- Un secteur très humide longeant le chemin d'Orge Combe et correspondant au départ des différentes niches d'arrachement anciennes ou récentes, et à des terrains de perméabilité plus grande (lentilles ou couches) ; ce type est illustré par la source sommairement captée en contrebas du chemin d'Orge Combe.
- Un secteur à suintement occulte en provenance des "Roches de Léaz" par l'intermédiaire des éboulis tapissant le pied de ce petit massif ; les apports sont toutefois assez maigres.

(1) - Pour les tableaux et plans se reporter au rapport de synthèse.

- Un secteur très humide à la cote 390 - 380 où chaque crevasse pratiquement possède une ou plusieurs sources ; elles peuvent correspondre, soit à des résurgences d'écoulements de sources situées plus haut, soit à des émergences en provenance de la lentille de gravier.

Les écoulements de source sont mal hiérarchisés pour la plupart, exception faite à la source sommairement captée à la base du chemin d'Orge Combe dont l'écoulement a été canalisé artificiellement sur 200 mètres.

Les débits sont faibles et très influencés par la pluviométrie. Au cours de l'été 1967, de nombreuses sources étaient complètement tarées. La source captée, citée plus haut débitait environ 5 l/min. elle peut atteindre 40 l/min à 60 l/min en période de hautes eaux. Les sources du niveau 380 - 390 ont des débits insignifiants, toutefois le collectage des eaux dans les différents arrachements des bords du Rhône peut se traduire par des débits de 1 à 2 l/s en moyenne.

En conclusion, malgré les débits faibles, il faut compter cependant avec une humidité généralisée importante notamment en tête du glissement et suffisante pour entretenir le ramollissement de l'argile et les mouvements de solifluxion.

III°, D - 2 - Le ruissellement.

Du fait du sol argileux et de la pente assez forte par endroit, le ruissellement peut être supérieur à l'infiltration dans certaines parties du glissement.

Le secteur des bourrelets 1, 2 et 3 dans les prairies a un coefficient de ruissellement fort, il suffit de constater la formation de véritables nappes d'eau dévalant la pente lors de journées pluvieuses. Nous avons pu estimer ainsi à 5 l/s le débit d'écoulement consécutif à un orage, passant à la hauteur du sondage S.M.5, en provenance du chemin d'Orge Combe. Ces écoulements épidermiques vont constituer les mares d'eau temporaires dans les nombreux replats dont nous reparlerons dans le paragraphe suivant. A partir de la cote 400, l'infiltration devient prépondérante.

Mis à part le ruissellement de surface, consécutif aux pluies, nous citerons l'écoulement de la source captée sujet à des pertes vers le niveau 380 et le petit canal au Sud du glissement. Dans la partie haute du glissement son influence semble être assez limitée, par contre il favorise nettement l'érosion au niveau 380 et la saturation des coulées argileuses.

III°, D - 3 - Zones de stagnation et d'infiltration.

Elles sont nombreuses et peuvent constituer jusqu'à 1/4 de la superficie totale du glissement. Nous avons dénombré de nombreux replats d'importance assez réduite entre les trois premiers bourrelets et d'autres beaucoup plus importants comme celui du niveau 380. Ces replats se présentent même comme des dépressions de 1 à 1,50 m de profondeur pour les plus conséquentes. Elles recueillent donc l'eau pendant un certain temps (2, 3, 4 mois pour quelques unes) ; une partie de cette eau s'évapore tandis qu'une autre, non négligeable, s'infiltré petit à petit.

Une humidité constante affecte les parties centrale et droite du glissement spécialement dans le replat 380 - 390, on y trouve de véritables marécages quasi permanents dus à la pluviométrie, aux sources, aux écoulements amont et signalés par une végétation abondante de prêles. Ces marécages contribuent à l'humidification de l'argile et fournissent l'eau en participant au ravinement et coulées des berges du Rhône.

III°, D - 4 - L'eau souterraine.

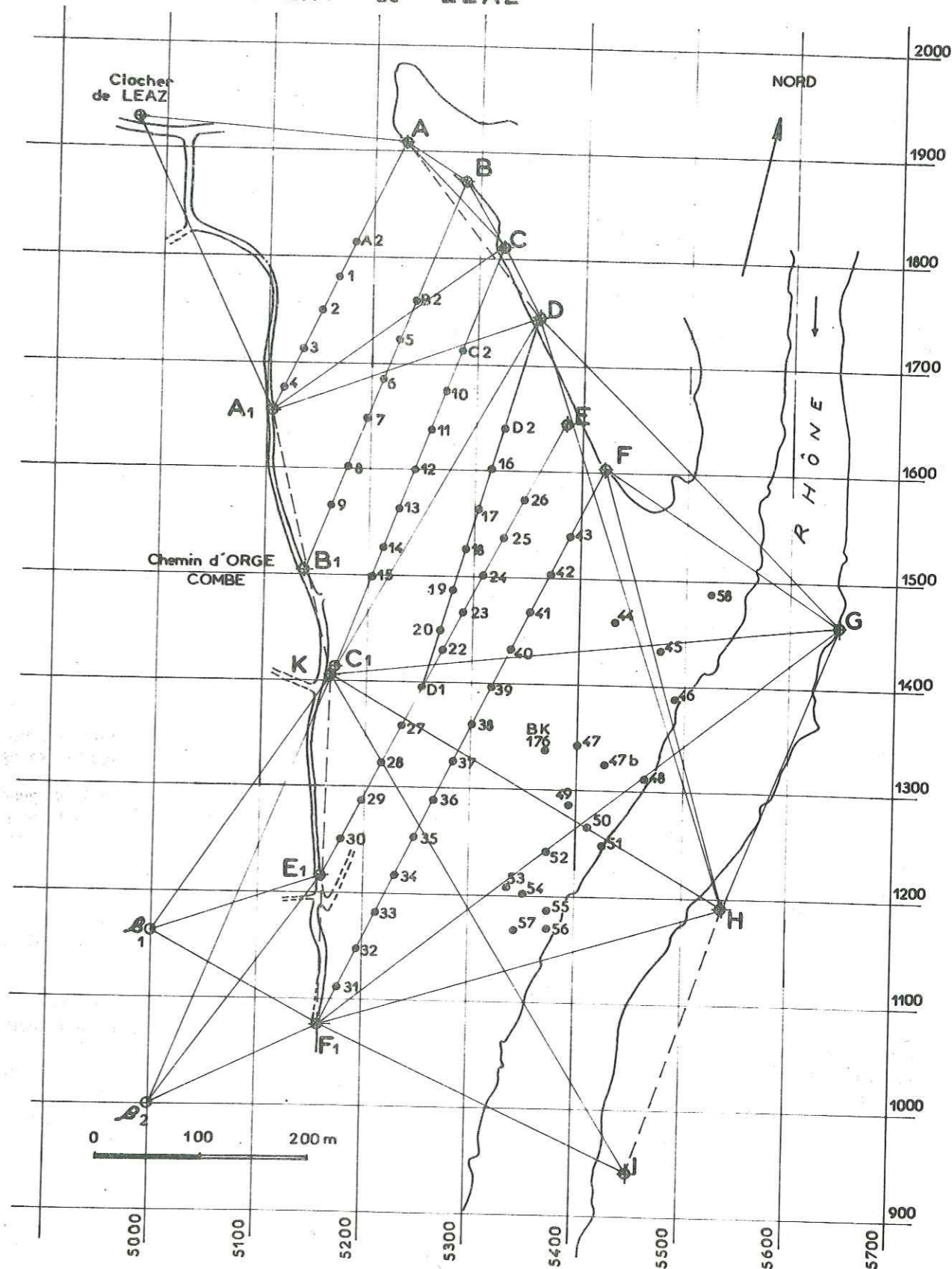
Le principal niveau aquifère correspond à la couche de gravier inférieur reposant sur la molasse considérée comme un substratum imperméable. Cette nappe de versant a un gradient hydraulique assez fort (12 à 15°) et son écoulement se trouve soumis aux variations de faciès rapides de la couche de gravier (lentilles argileuses, zones conglomérées). De plus, les coulées argileuses des berges obstruent en partie les exutoires possibles, et provoquent une mise en charge localement ; le sondage S.M. 3a rencontré plusieurs niveaux aquifères en charge dont le plus important se situe à 31 m de la surface avec une remontée de 14 m en cours d'exécution du sondage ; les relevés piézométriques hebdomadaires montrent une légère charge de 4 à 5 m. Il y aurait donc à craindre des sous-pressions s'exerçant sur le plancher de la couche argileuse et susceptibles de déclencher des mouvements dans toute la masse, précisons toutefois que nous n'avons pas retrouvé de niveau d'eau en charge ailleurs qu'au S.M.3. Le battement de la nappe tel qu'on peut l'observer dans les sondages, est faible (il faut tenir compte d'un certain déphasage car les tubes ne sont pas forcément crépinés en face des zones perméables, pour ne pas introduire des points faibles dans la colonne de déformation en plastique.)

RESEAU de CONTROLE

TOPOGRAPHIQUE

Fig.86

GLISSEMENT de LEAZ



III°, E - CINEMATIQUE DU GLISSEMENT.

A l'aide de tableaux et de graphiques de déplacement en fonction du temps, nous retracerons l'évolution du glissement au cours de ces trois dernières années (1).

III°, E - 1 - Dispositif de mesure (fig. 86)

En décembre 1964, fut implantée une série de cinq alignements A AI - B BI - C CI - D DI - E EI - F FI, comprenant des témoins topographiques numérotés de 1 à 43, constitués d'une barre de fer de 1,50 à 2,00 m de longueur, enfoncée dans le sol et bétonnée sur 0,60 à partir de la surface du sol.

En mars 1967, le dispositif est complété par 16 autres témoins implantés dans la berge rive droite du Rhône et triangulés de la rive opposée à partir de trois points fixes G - H - I. Ces témoins dépassent du sol de 80 cm environ et sont protégés par des buses en ciment solidaires du terrain.

Entre juillet et novembre 1967, cinq sondages mécaniques furent équipés chacun d'un tube plastique vulcanisé dans lequel on fait passer une série de trois calibres destinés à mesurer la déformation des tubes. Ce système a le mérite d'être peu coûteux mais sa rentabilité scientifique est réduite car une déformation brutale du tube à un niveau donné bloque les calibres et empêche de savoir ce qui se passe en-dessous. De plus, il ne permet pas de connaître la valeur et le sens du déplacement.

III°, E - 2 - Fréquence des mesures.

A la suite des deux premiers relevés de 1966, une fréquence de mesure a été fixée selon le schéma suivant :

- contrôle tous les mois, des alignements D DI - E EI - F FI implantés dans la partie active du glissement (solifluxion à déchirures, coulées).
- contrôle tous les mois des témoins 44 à 58 y compris la borne kilométrique 176 R.D. situés sur la berge même du Rhône.
- contrôle tous les trois mois des alignements A AI - B BI - C CI implantés dans le secteur des bourrelets N° 1 et 2.
- contrôle au moins une fois l'an, des stations de départ des alignements sur le chemin d'Orge Combe.

Une telle fréquence, scrupuleusement respectée permet de suivre l'évolution des mouvements en fonction du temps, de la pluviométrie, de calculer le temps de réponse et de contrôler l'évolution des vitesses.

III°, E - 3 - Résultats de trois ans de mesures - Interprétations.

Différents diagrammes et tableaux (déplacements horizontaux et verticaux en fonction du temps - distribution des vitesses - déplacements moyens) permettent de tirer les conclusions suivantes (tableaux 42-43 fig. 87, 88, 89).

a) Les déformations observées en sondage (voir tableau n° 42) mettent en évidence, d'une façon générale, pour au moins trois tubes, (S. M. 2 - S. M. 3 - S. M. 4) des mouvements relativement profonds : entre 12,50 m et 14 m. Le S. M. 4 situé sur le replat 380 enregistre à ce jour la déformation la plus importante (les calibres N°1, 2 et 3 se bloquant à 14 m) et traduit ainsi l'activité non négligeable de cette zone. Mais nous ne connaissons pas la forme exacte prise par le tube (rupture localisée - courbure continue).

b) Les mouvements superficiels traduits par les relevés topographiques sont lents en moyenne, on compte d'ailleurs les vitesses en mm/mois ; toutefois ils ne peuvent être considérés comme négligeables (tableau n° 43).

c) Le secteur le plus actif est marqué par les déplacements des témoins de la ligne F FI notamment des bornes 41-40-39-38-37-36-35 avec un maximum de mouvements horizontaux de 7,64 m en 3 ans 1/2 pour la borne 36 (4 bornes se sont déplacées de plus d'un mètre pour une période de 12 mois). Ces témoins ont enregistré les mouvements de surface violents (solifluxion - coulée).

Les déplacements maxima correspondent à la zone centrale du glissement où règne la solifluxion à déchirures et en gradins et s'amortissent vers les "Roches de Léaz" et le chemin d'Orge Combe - Platière.

(1) - Nous n'incorporons à ce chapitre des tableaux et graphiques de déplacement que pour quelques témoins seulement.

d) Les déplacements des alignements A AI - B BI - C CI sont de l'ordre de 3 à 8 cm pour une période de 3 ans 1/3 avec toutefois des maxima de 20 cm pour trois témoins situés vers le secteur de la source captée et qui pourraient indiquer une reprise des déformations plastiques dans le bourrelet N° 2.

e) Les alignements intermédiaires D DI - E EI accusent des déplacements de 10 à 55 cm pour 3 ans 1/2 correspondant au mouvement d'une grande fissure située au-dessous du S. M. 2.

f) Les témoins implantés dans la berge rive droite du Rhône entre la cote 350 et 330 réagissent très peu, les déplacements sont de l'ordre de l'erreur de mesure, ce qui est assez rassurant car on peut en déduire que le front du glissement reste stable au niveau de la couche de gravier inférieure et exclure pour le moment l'hypothèse très pessimiste d'un glissement de la totalité des terrains de couverture sur le substratum. Ces témoins devront néanmoins être surveillés constamment de manière à enregistrer un tel mouvement profond.

A cet effet, la plupart d'entre eux ont été dégagés dans la mesure du possible, des arrachements affectés par les coulées argileuses.

g) Par contre, ceux échelonnés entre la cote 350 et 380 (44 - 47 - 47b - 49 - 52 - 53 - 54 - 57 BK 176 r.d.) enregistrent les affaissements successifs le long de la grande fissure ; les mouvements de coulées et les décollements de plaques d'argile (1 à 1,50 d'épaisseur) et reflètent la complète désorganisation du replat 380 (le plan montrant l'agencement des fissures et crevasses au cours de la période janvier 1967 et mai 1967) ne correspond plus à la réalité pour ce secteur dans la période février - juin 1968 ; il devient d'ailleurs impossible de figurer cet agencement tant la désorganisation est grande.

La période couvrant les mois de janvier, février, mars, avril 1968 (neige abondante en janvier, février) se traduit par une reprise très nette des mouvements (maximum 2,05 m pour le témoin 47b) ; les vitesses varient entre 12 mm/mois et 455 mm/mois pour la période écoulée entre la fin novembre 1967 et le 17 avril 1968 et sont supérieures à celles des autres alignements pour la même période.

Bien que ces déplacements reflètent des mouvements superficiels (un des témoins a dû d'ailleurs être remplacé en mars 1967, le piquet original ayant glissé dans la pente avec une plaque d'argile), ils représentent cependant des avertissements sérieux dans le cadre d'un glissement des 360 000 m3 délimités par la grande crevasse.

Les graphiques de déplacement montrent une certaine divagation dans les mouvements de quelques témoins qui peut être interprétée de plusieurs façons :

- les déplacements vers le haut du versant (piquet reculant dans la pente) peuvent être d'abord dus à des erreurs de visées ou de mesures d'angle ; dans le domaine des déplacements de l'ordre de 5 mm, ces incertitudes sont concevables pour des visées sur des distances allant de 150 m à 300 m.
- les visées se faisant sur le sommet du témoin (équipé pour la circonstance d'un cône métallique du genre de ceux des fils à plomb) les mouvements d'affaissement d'arrière en avant provoquent un déplacement plus important du pied du témoin par rapport à la tête.
- les mesures 1-2-3-4-5 (mars - mai - août - octobre - novembre 1967) montrent une divagation assez légère qui pourrait indiquer une succession de mouvements différentiels de plaques d'argile comme nous avons pu d'ailleurs le constater à l'oeil ; les points restent cependant relativement groupés.

h) Du point de vue évolution du glissement pendant ces trois dernières années (de 1965 à début 1968), nous pouvons conclure :

- que les mouvements sont cycliques en relation avec la pluviométrie dont on sait par ailleurs qu'elle agit directement sur tous les phénomènes de solifluxion et de coulée. Les cycles de réactivation sont plus ou moins importants ; les plus conséquents sont ceux de 1965 et des premiers mois de 1968. En raison de l'irrégularité des mesures, il est difficile de faire des corrélations précises entre les chutes de pluie et les déplacements horizontaux et verticaux.
- que chaque pluie anormale (excédent par rapport à la moyenne mensuelle, annuelle, accroissement du nombre de jours pluvieux, intensité anormale d'une averse) sera suivie inévitablement à plus ou moins court terme de reprises de mouvements.

- que les années 1966 - 1967 se traduisent par une relative stabilisation de l'ensemble des mouvements (fig. 88) :

en 1965 :	19 témoins se sont déplacés de	0 à 50 mm
en 1966 :	29 " " " de	0 à 50 mm
en 1967 :	33 " " " de	0 à 50 mm

TABLEAU N° 42 :

MESURES DE DEFORMATION DE TUBES PLASTIQUES EQUIPANT LES SONDAGES S.M. 1 bis à S.M. 5 (GLISSEMENT DE LEAZ)

DATE DE LA MESURE	SONDAGE 1 bis			SONDAGE 2			SONDAGE 3			SONDAGE 4			SONDAGE 5			Cal. n°	l mètre	d mm.
	Calibre 1	Cal. 2	Cal. 3	Cal. 1	Cal. 2	Cal. 3	Cal. 1	Cal. 2	Cal. 3	Cal. 1	Cal. 2	Cal. 3	Cal. 1	Cal. 2	Cal. 3			
4-3-1968	45,18 fond			13,40	48,47 fond		12,43	33,75 fond		14,05	14,14	50,60 fond	40,34 fond					
12-3-1968	45,18			13,50	48,47		12,42	33,75		14,05	14,12	50,58	40,34					
22-3-1968	45,15			13,50	48,46		12,37	33,75		14,04	14,11	50,50	40,23					
3-4-1968											14,10	50,50						
8-4-1968	45,14			13,50	48,43		12,37	33,73		14,02	14,08	50,50	40,32					
19-4-1968	45,12			13,50	48,41		12,38	33,72		14,01	14,08	50,50	40,28					
4-5-1968	45,12			13,50	48,41		12,35	33,71		14,01	14,07	50,53	40,28					
15-5-1968	45,12			13,46	48,40		12,37	33,70		14,00	14,08	50,54	40,29					
11-6-1968	45,11			13,46	48,38		12,37	33,68		13,985	14,075	14,15	40,28					
26-6-1968	45,11			13,49	48,38		12,35	33,67		13,990	14,065	14,15	40,28					
19-8-1968	45,10			13,45	48,37		12,335	33,68		13,990	14,060	14,14	40,27					

- 254 -

TABLEAU N° 43 -

DEPLACEMENTS HORIZONTAUX DE QUELQUES TEMOINS

- GLISSEMENT DE LEAZ -

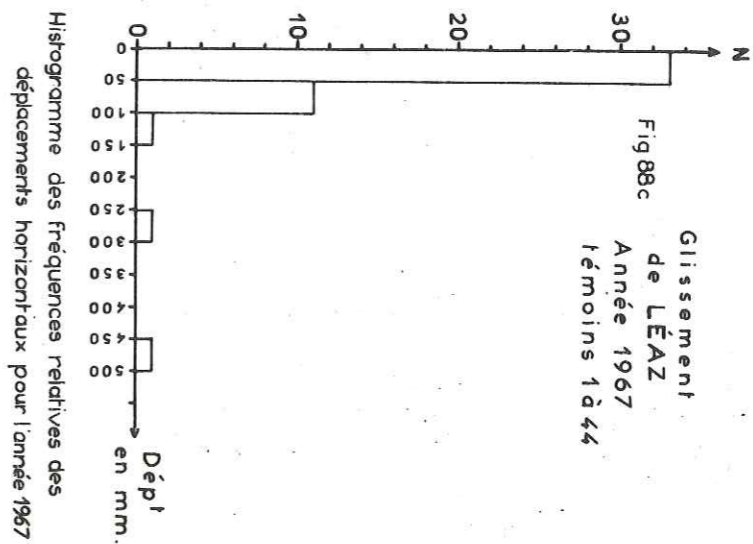
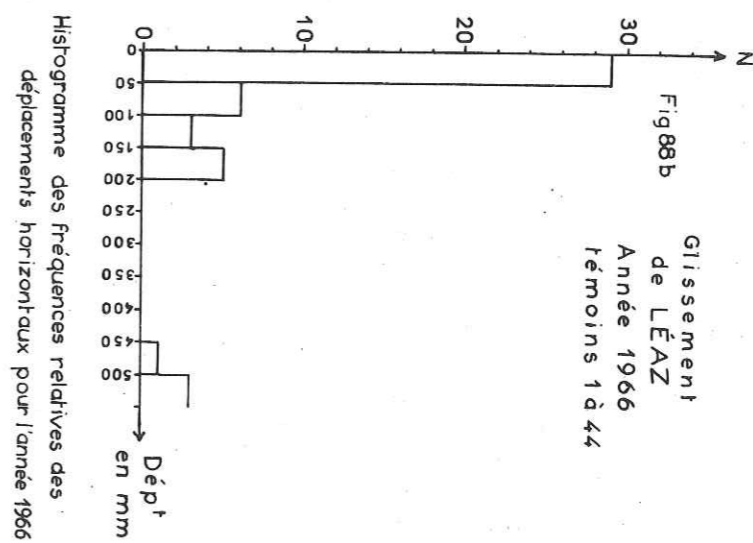
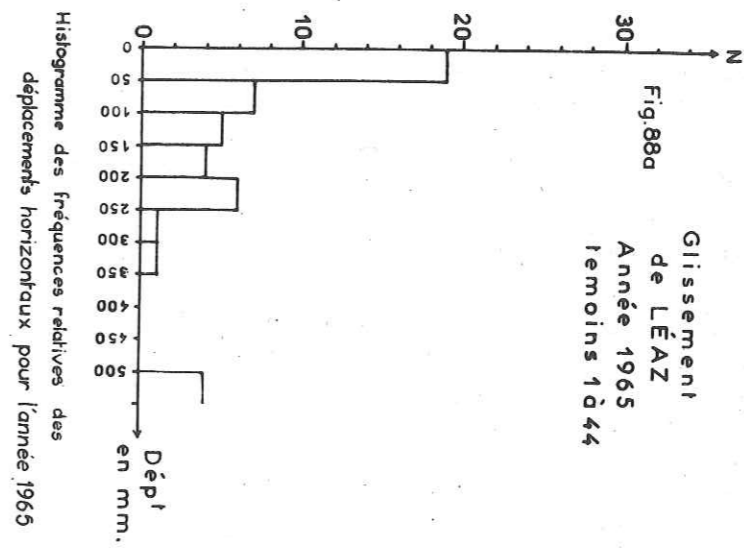
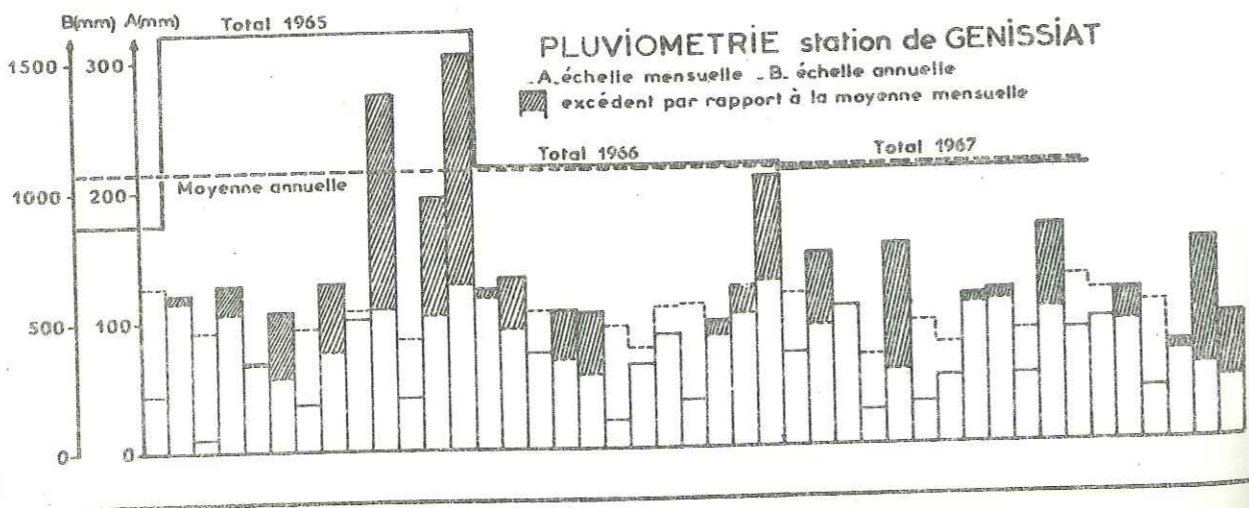
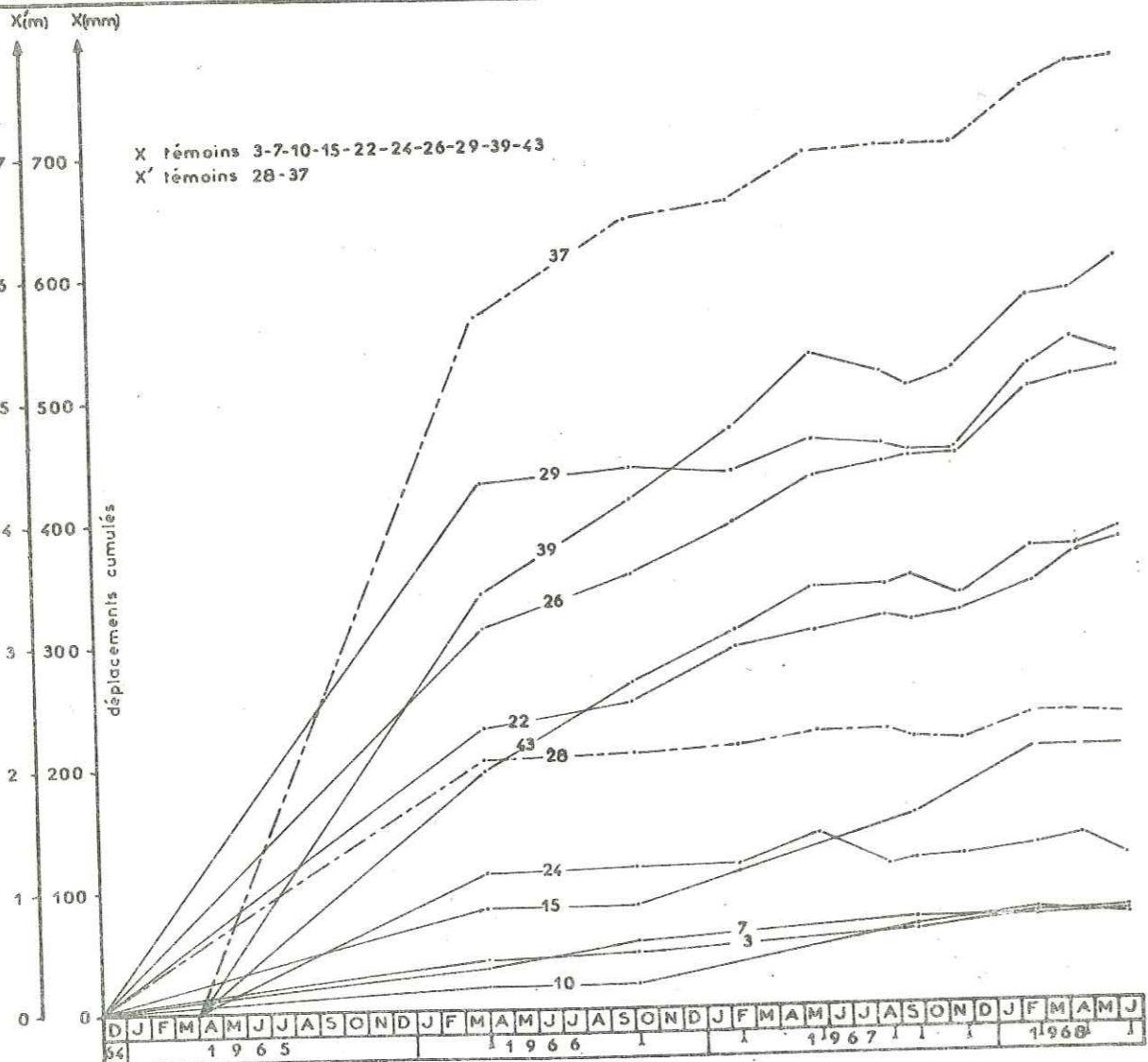
(AIN)

N° des témoins	Implantation en	1 ^{er} mes. : 1/4/1966			2 ^e mes. : 4-10/10/1966			3 ^e mes. : 7-15/2/1967			4 ^e mes. : 22-24/5/1967			5 ^e mes. : 22-25/8/1967		
		dc	dr	V	dc	dr	V	dc	dr	V	dc	dr	V	dc	dr	V
3	Déc. 1964	40	40	2,5	45	5	0,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	Déc. 1964	35	35	2,2	55	20	3,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	Déc. 1964	20	20	1,2	20	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	Déc. 1964	82	82	5,1	82	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	Déc. 1964	230	230	14,3	250	20	3,3	292	42	9,8	305	13	4,0	317	12	4,0
26	Déc. 1964	310	310	19,3	355	45	7,5	395	40	9,4	430	35	10,7	440	10	3,3
28	Déc. 1964	2030	2030	126,8	2070	40	6,6	2130	60	14,1	2210	80	24,6	2215	5	1,6
29	Déc. 1964	430	430	26,8	440	10	1,6	435 ?	(-5) ?	(1,1) ?	460	25	7,6	457 ?	(-3) ?	(1,0) ?
36	Avr. 1965	112	112	9,3	115	3	0,5	115	0	0,0	140	25	7,1	111 ?	(-29) ?	(9,6) ?
37	Avr. 1965	5620	5620	468,3	6440	820	136,6	6590	150	37,5	6990	400	114,2	6995	5	1,6
39	Avr. 1965	340	340	28,3	415	75	12,5	470	55	13,7	530	60	17,1	515 ?	(-15) ?	(5,0) ?
43	Avr. 1965	195	195	16,2	265	70	11,6	305	40	10,0	340	35	1,0	340	0	0,0
N° des témoins		6 ^e mes. : 26/9/1967			7 ^e mes. : 24/11/1967			8 ^e mes. : 27-28/2/1968			9 ^e mes. : 19-20/4/1968			10 ^e mes. : 12-14/6/1968		
		dc	dr	V	dc	dr	V	dc	dr	V	dc	dr	V	dc	dr	V
3		60	15	1,2	-	-	-	73	13	2,6	-	-	-	75	2	0,2
7		70	15	1,2	-	-	-	70	0	0,0	-	-	-	73	3	0,9
10		63	43	3,5	-	-	-	75	12	2,4	-	-	-	71 ?	(-4) ?	(1,1) ?
15		155	63	5,2	-	-	-	208	53	1,06	-	-	-	208	0	0
22		311 ?	(-6) ?	(6,0) ?	318	7	3,5	340	22	7,3	365	25	12,5	375	10	5,0
26		445	5	5,0	445	0	0	500	55	18,3	510	10	5,0	515	5	2,5
28		2170 ?	(-45) ?	(45,0) ?	2165	(-5) ?	(2,5) ?	2350	185	61,6	2350	0	0,0	2340 ?	(-10) ?	(5,0) ?
29		447 ?	(-10) ?	(10,0) ?	450	43	1,5	520	70	23,3	540	20	10,0	525 ?	(-15) ?	(7,5) ?
34		119	8	8,0	120	1	0,5	127	7	2,3	135	8	4,0	119 ?	(-16) ?	(8,0) ?
37		7000	5	2,5	7000	0	0	7450	450	150,0	7640	190	95,0	7670	5	15,0
39		502 ?	(-13) ?	(13,0) ?	517	15	7,5	575	58	19,3	580	5	2,5	605	25	12,5
43		347	7	7,7	330 ?	(-17) ?	(8,5) ?	370	40	13,3	370	0	0,0	385	15	7,5

dc = déplacements horizontaux cumulés, en mm.
 dr = déplacements relatifs horizontaux entre chaque mesure, en mm.
 V = vitesses horizontales, en mm/mois

- 255 -

Fig.87 DEPLACEMENTS HORIZONTAUX EN FONCTION DU TEMPS Glissement de LEAZ



- que les vitesses après s'être annulées, recommencent à croître au début de l'année 1968 et qu'elles devront donc être contrôlées à nouveau pendant l'été afin de savoir si elles correspondent à un stade de réactivation temporaire ou si au contraire, elles se caractérisent par un accroissement continu qui laisserait présager des déplacements plus importants ou une rupture catastrophique confirmant l'une ou l'autre des hypothèses envisagées dans les paragraphes précédents.
- que ces déplacements de type superficiel peuvent cacher d'autres mouvements profonds en phase préparatoire à la rupture finale.
- que les déplacements les plus importants correspondent sensiblement à la zone axiale du talweg argileux mis en évidence par la géophysique et au secteur du replat 380.

Nous fournirons enfin quelques explications concernant les tableaux et graphiques joints à l'étude des déplacements.

Les déplacements et vitesses sont toujours exprimés en mm et en mm/mois excepté pour les mouvements très importants dépassant le mètre.

Les déplacements horizontaux cumulés sont le reflet exact des tableaux de mesures fournis par le topographe, nous avons donc conservé sur les différents graphiques les points aberrants (recul du témoin vers le haut du versant) dont on ne sait comment ils doivent être interprétés. Il semble qu'ils soient dus, outre les erreurs de visée toujours possibles, à la méthode de contrôle consistant à ne prendre en compte que les différences de niveau et les déplacements horizontaux dans une seule direction ; celle perpendiculaire au Rhône. On ne peut de ce fait enregistrer les mouvements dans les directions obliques par rapport au Rhône qui sont très courantes dans ce genre de glissement par solifluxion.

Des mesures angulaires sont donc indispensables pour connaître les trajectoires des témoins.

IV° - AGE ET CAUSES DU GLISSEMENT

IV°, A - AGE, STADE D'EVOLUTION DU GLISSEMENT.

Ce que nous observons actuellement n'est en fait que la réactivation périodique d'un mouvement ancien contemporain du retrait des glaces wurmiennes. La zone la plus spectaculaire c'est-à-dire celle superficielle (1 à 5 m) affectée de solifluxion intense est vraisemblablement liée directement à la pluviométrie et à chaque cycle correspondant une aggravation du mouvement. D'après enquête auprès des habitants de Léaz pour qui le glissement est connu depuis des générations, les formes se seraient accentuées au cours de ces 50 dernières années et plus spécialement dans la dernière décennie.

Les mouvements de surface dans l'argile grise (solifluxion et coulées) se sont en effet aggravés au cours de l'année 1965 excédentaire en pluie (1521 mm) processus déjà amorcé sans doute à la suite des pluies abondantes de l'année 1960 (1617 mm).

Quant au mouvement plus profond masqué par celui de surface, il est difficile de préciser à quel stade d'évolution il en est arrivé. Toute la partie moyenne et supérieure (du chemin d'Orge Combe à la cote 380) peut être considérée comme étant dans une phase préparatoire très lente précédant, à une échéance impossible à déterminer, la phase de rupture. Un indice de l'aggravation est fourni par l'allure critique de la région située à la cote 380 marquant les bords du Rhône ; cette zone prend un aspect menaçant et pourrait présager une rupture importante proche.

IV°, B - CAUSES DU GLISSEMENT.

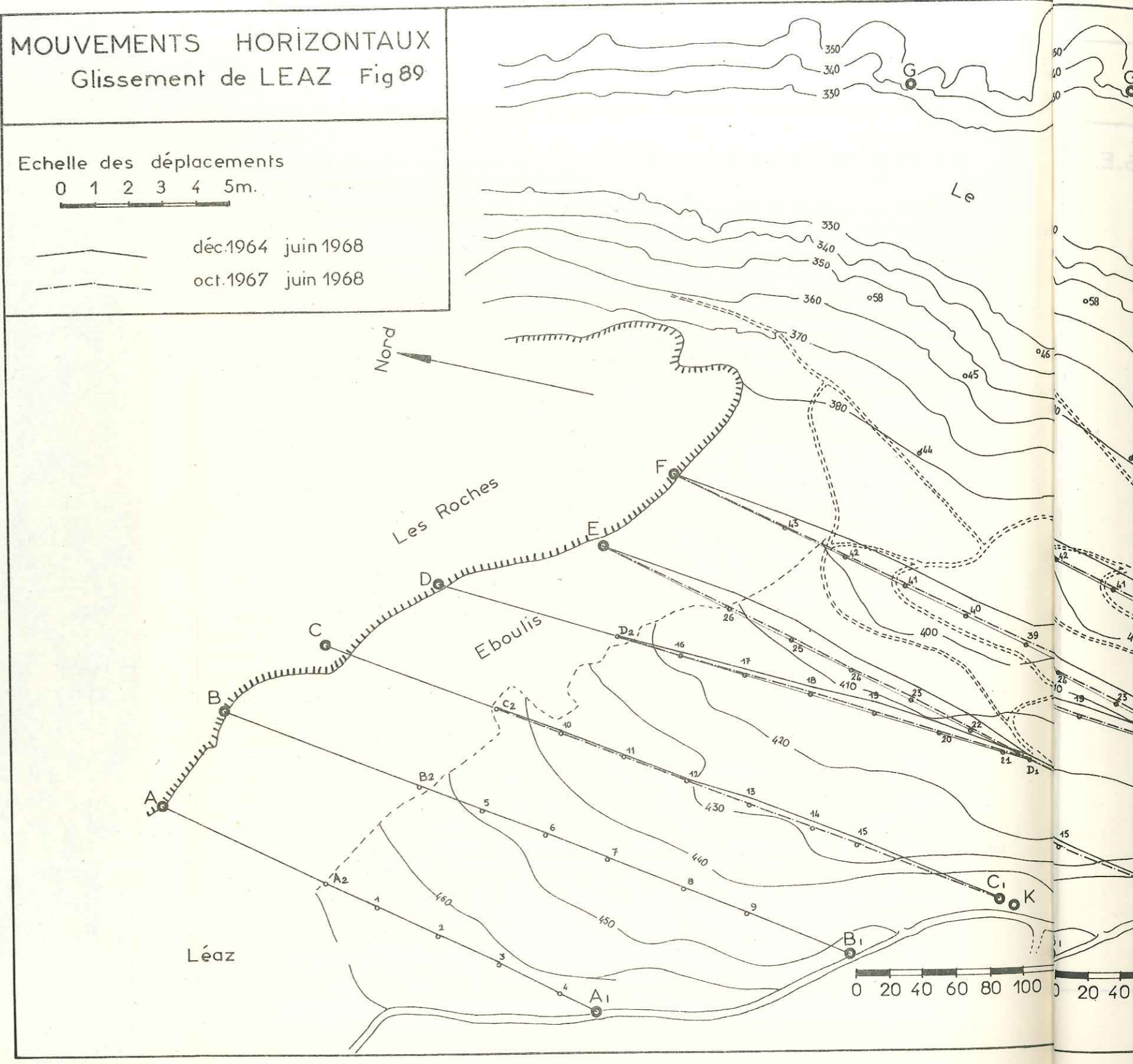
Nous distinguerons deux sortes de causes :

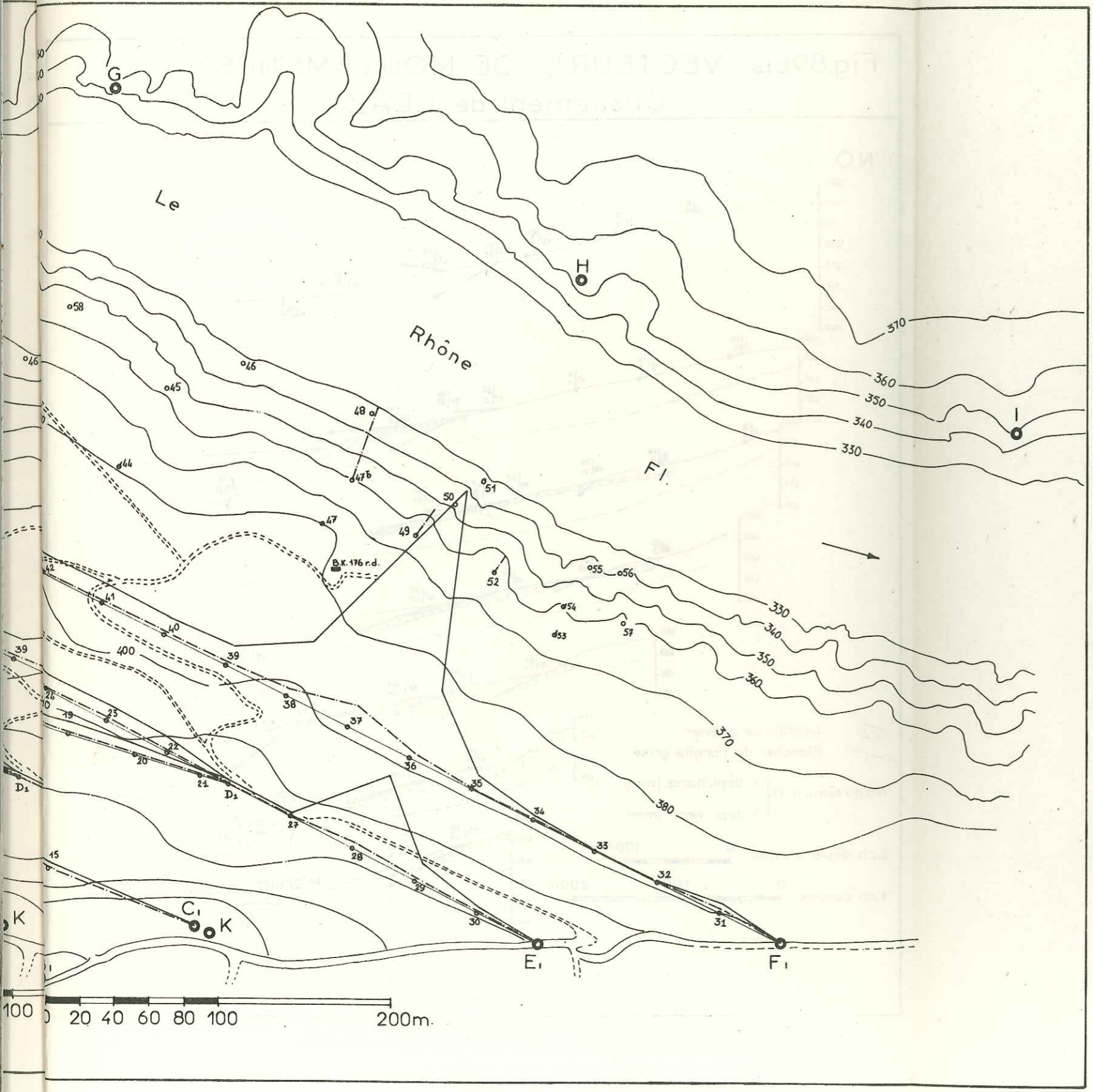
- les causes lointaines représentant l'ensemble des facteurs divers susceptibles de créer un climat favorable au glissement.
- les causes finales dont les effets sont plus ou moins rapides et responsables dans le cas du glissement de Léaz des périodes de réactivation.

MOUVEMENTS HORIZONTAUX
Glissement de LEAZ Fig 89

Echelle des déplacements
0 1 2 3 4 5m.

— déc.1964 juin 1968
- - - oct.1967 juin 1968





a) Les causes lointaines.

Ce sont essentiellement :

- La présence d'une couche d'argile grise varvée très sensible aux agents atmosphériques notamment la pluie et les brouillards, et à tous les apports d'eau souterrains ou superficiels (poches de gravier en charge ou non). Sa limite de plasticité basse étant dépassée, il suffit d'une pente même peu accusée pour qu'il y ait déclenchement de mouvements de solifluxion. En outre le pouvoir de fissuration superficielle de l'argile permet une augmentation de l'infiltration.
- La présence d'une couche de gravier plus ou moins argileux, pesante, renfermant de l'eau susceptible de se mettre en charge localement et permettant une humidification constante de la limite supérieure et surtout inférieure gravier - argile. Les mouvements profonds, nous l'avons vu, sont localisés en partie autour de cette limite inférieure.
- La présence de niveaux fins de sablon (varves sableuses) dans la masse argileuse, représentant des zones de moindre résistance au cisaillement.
- L'existence d'un talweg enterré dans l'axe de glissement avec des pentes pouvant atteindre jusqu'à 20°, favorisant ainsi le rôle de la pesanteur dans les mouvements de la lentille de gravier.
- L'existence de nombreuses zones de stagnation se créant à la faveur des replats, permettant un stockage de l'eau de ruissellement pendant un certain temps (2 mois) et une infiltration certes lente, mais néfaste à la bonne tenue de la couche argileuse.
- La quantité d'eau importante, soit sous forme de poches ou de nappes de versant à surface piézométrique inclinée, soit sous forme de ruissellement mal drainé.

b) Les causes finales.

Elles sont représentées surtout par l'aggravation périodique des conditions climatiques (orages - neige - brouillard) de la région.

- Comme on peut le constater sur les graphiques des déplacements en fonction du temps, les pluies provoquent d'une façon assez nette la réactivation périodique des mouvements et sur les bords du Rhône elle facilite l'action de l'érosion régressive. Leur influence sur le comportement de la lentille de gravier ne peut être que néfaste, mais en l'absence de points d'observation piézométriques, nous ne pouvons déterminer avec précision les effets des circulations d'eau.
- Il semble difficile d'incriminer les variations de niveau de la retenue de Génissiat, les témoins topographiques implantés à la cote 340 - 360 n'enregistrent pour la plupart que des déplacements minimes parfois de l'ordre de l'erreur de mesure. Cependant elle contribue à éroder et affouiller le pied des coulées argileuses du bord du Rhône, processus se répercutant en tête de coulées (cote 380) et se traduisant par une augmentation de l'influence de la pesanteur (appel au vide) et de l'érosion régressive.

V° - PROPOSITIONS DE REMEDES SUSCEPTIBLES DE STABILISER LES MOUVEMENTS.

L'eau étant un des facteurs essentiels d'instabilité, il est impératif de l'empêcher de pénétrer dans la zone en mouvement et de modifier le régime des circulations dans le glissement lui-même.

V°, A - DRAINAGE DES EAUX DE SURFACE.

- Du point de vue préventif :

- + on canalisera les eaux de ruissellement dévalant le chemin d'Orge Combe, au moyen d'un caniveau étanche véhiculant l'eau en dehors de la zone sensible c'est-à-dire vers La Platière.
- + tout arrosage ou tout rejet liquide intempestif sera interdit dans le glissement à quelque endroit que ce soit.
- + le canal descendant du village de Léaz sera lui aussi détourné vers La Platière afin d'éviter toute aggravation des mouvements dans la zone du layon F - G.

- Du point de vue correctif :

bien que la stabilisation de la couche superficielle en solifluxion soit difficilement réalisable d'une façon définitive, plusieurs moyens peuvent être envisagés :

- + captage des sources les plus importantes, notamment dans les zones très humides du pied de la crête supportant le chemin d'Orge Combe et du replat 380.
- + tous les écoulements seront dirigés artificiellement au moyen d'un réseau de drains superficiels à ciel ouvert ; les traversées de secteurs très crevassés se feront sous buse plastique. Les exutoires de ce réseau seront ^{éventuellement} plus possible en dehors des zones actives ce qui n'est guère possible que vers les "Roches de Léaz" en empruntant l'éboulis situé au pied de ce petit massif calcaire, ou encore vers La Platière.
- + dans un deuxième temps un autre système de drainage superficiel par tranchées drainantes peut être envisagé.

Dans tous les cas de figure on utilisera des matériaux souples (les buses en ciment sont à proscrire) et il faudra s'attendre à des déformations importantes des canaux et tranchées.

V°, B - STABILISATIONS DES MOUVEMENTS PROFONDS.

Elle doit être envisagée à une toute autre échelle, le but à atteindre est là encore le drainage de l'eau contenue dans les couches de graviers inférieure et surtout supérieure (lentille de gravier) ; mais ceci nécessite une étude plus poussée de l'infrastructure hydraulique du glissement et des perméabilités des terrains (étude de deuxième phase prévue pour 1969).

Plusieurs solutions peuvent être retenues :

- + rabattement de la nappe des graviers inférieurs en amont du glissement au moyen d'une batterie de forages ou de puits.
- + la même opération peut être effectuée dans le glissement lui-même avec drainage de l'eau contenue éventuellement dans la grande lentille de graviers. L'implantation et l'équipement des forages devra être étudié d'une façon précise de manière à éviter des déformations importantes susceptibles de rendre rapidement inefficaces ces ouvrages.
- + une dernière solution est celle du puits à drains rayonnants (les drains étant implantés à différents niveaux dans la lentille) raccordé à une galerie creusée dans la couche de graviers inférieure, elle-même équipée de drains en éventails ; on peut espérer ainsi drainer à la fois la lentille de gravier et atténuer sinon éliminer la mise en charge de la nappe. Cette galerie rejeterait l'eau directement au Rhône, elle devrait être percée avec le minimum d'explosifs de manière à ne pas trop ébranler les matériaux en mouvement, déjà passablement morcelés.

Tous les ouvrages devront pouvoir servir de repères de mouvement et la stabilisation sera contrôlée très sérieusement.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

PROSPECTIVES - ETUDES STATISTIQUES - CARTES DE POTENTIALITE DE GLISSEMENT

Toutes les notions énoncées précédemment, qu'il s'agisse de classifications des causes de glissement ou de leurs formes, montrent à quel point les nombreux problèmes soulevés par les mouvements de terrain, tant au point de vue théorique que pratique sont complexes. Nous y trouvons là la justification et l'explication des nombreux tâtonnements et hésitations des gens compétents dans ce domaine. Pour notre part, au cours de ce mémoire, nous avons donc posé avec prudence un certain nombre de questions auxquelles il est urgent de pouvoir répondre le plus rapidement possible, les exigences de la vie moderne et l'audace grandissante de nos contemporains imposant en effet aux versants et aux matériaux des sollicitations nouvelles de plus en plus importantes.

Le rôle du géologue devient dès lors prépondérant à condition qu'il sache et qu'il puisse s'intégrer dans une équipe pluridisciplinaire et fournir au mécanicien du sol et à l'ingénieur projeteur des observations fines et complètes susceptibles d'être exprimées sous une forme numérique simple et représentative de la réalité. C'est dans ce but que nous avons rappelé un grand nombre de données fondamentales et générales dont il est évident qu'elles sont la base de toute étude préventive ou corrective. Notre essai méthodologique bien imparfait certes, est destiné à proposer un premier schéma de collationnement logique des renseignements, à standardiser les données en vue d'étude statistique et partant à adopter par la suite les remèdes les plus efficaces. L'étude sérieuse préventive se révèle d'ailleurs négligeable devant les dépenses et dommages causés par le déclenchement d'un glissement de terrain. La commission routière des U.S.A. a chiffré le coût moyen d'un glissement de terrain à incidence économique.

POSTES	POURCENTAGE DU COUT TOTAL
- Frais d'étude (1)	1 %
- Problèmes fonciers, achat de terrains (2)	1 %
- Reconstruction d'un ouvrage	20 %
- Entretien (3)	38 %
- Dommages causés, retard dans le trafic, manque à gagner.	40 %

La méthode, une fois mise sur pied nous permet d'exposer quelques principes au sujet des études statistiques et de potentialité de glissement constituant les meilleures mesures préventives qui soient en face d'un avant projet.

A - ETUDE STATISTIQUE DE GLISSEMENT.

Elle a pour but de circonscrire les zones dangereuses glissées ou en cours de glissement dans une région donnée. Il existe à notre connaissance deux grandes méthodes.

L'une d'entre elles consiste à répertorier les principales données géométriques, hydrogéologiques, pétrographiques de la région et des glissements observés et de leur affecter une valeur numérique ou une perforation dans une carte mécanographique. Elle a été employée par les géologues tchèques lors d'un recensement des zones instables de leur pays.

L'autre partant de la cartographie des glissements fait une plus large place à l'analyse des causes probables de mouvement. Ainsi des données aussi diverses que la pente de la surface topographique, l'épaisseur, le pendage des couches, la pluviométrie, la densité de la fracturation etc... doivent être exprimées autant que faire se peut sous une forme numérique. Ces valeurs seront analysées d'une façon statistique de manière à déterminer la probabilité d'action des différents facteurs d'instabilité définis au chapitre 2°. De telles études ne peuvent être, bien entendu, que régionales et faire l'objet de recherches en équipe. Une solution pratique consiste dans la détermination d'une ou plusieurs données que l'on considère comme constantes (même formation géologique, même matériau par

- (1) - Les dépenses les plus considérables sont les travaux de reconnaissance, elles peuvent atteindre parfois le prix de revient des autres dépenses.
- (2) - Le prix d'achat de terrains glissés est souvent plus économique que les travaux de correction eux-mêmes.
- (3) - On estime qu'un entretien est justifié si son coût annuel est inférieur à 5 % du coût de toutes les mesures correctives devant durer 20 ans ou plus (normes américaines).

exemple) et dans la répartition statistique des autres critères dont les valeurs sont susceptibles de varier de façon importante (pente, cotes plan d'eau, débit etc...).

Outre leur caractère spéculatif indéniable (en particulier mise au point de classifications), elles sont la base des études et cartes de potentialité de glissement.

B - CARTE DE POTENTIALITE DE GLISSEMENT.

Elle offre un intérêt certain en permettant la différenciation des :

- zones stables à long terme sans problème particulier,
- zones instables actives très dangereuses à éviter obligatoirement,
- zones ayant glissées (passé récent ou ancien) nécessitant des études préalables de contrôle,
- zones instables où des mesures de correction peuvent être raisonnablement envisagées et mises en œuvre,
- zones instables potentielles ou douteuses (naturellement ou artificiellement) demandant des études complémentaires précises préalablement à toute implantation.

Pour ce faire, l'étude des glissements existants et l'établissement d'une carte géotechnique doivent obligatoirement susciter les questions suivantes :

- quels sont les risques d'extension d'un glissement existant ou quelles sont les raisons de sa limitation dans l'espace ?
- quelle sera l'évolution probable d'un versant soumis aux conditions naturelles ? Pourquoi tel ou tel versant ne glisse-t-il pas ?
- quelles modifications et quelles contraintes nouvelles imposera-t-on au versant en construisant des ouvrages et quelles peuvent être les réactions à ce nouvel état ?

Obligation est faite alors d'étudier dans le détail les facteurs d'instabilité probable :

- l'extension d'une couche de "mauvais terrain",
- la géométrie des plans pouvant jouer le rôle de surface de déformation,
- la géométrie des circulations d'eau superficielles et surtout souterraines (drains naturels profonds, nappe captive, surface de suintement, zones d'infiltration, érosion importante etc...),
- l'existence de zones de surcharge, de secteur stabilisant ou déstabilisant,
- les zones sismiques.

BIBLIOGRAPHIE

- A. S. C. E. : American Society of Civil Engineers.
A. S. T. M. : American Society for Testing Material.
B. S. G. F. : Bulletin de la Société géologique de France.
C. R. A. S. : Compte rendu de l'Académie des Sciences.
G. S. A. : Geological Society of America.
H. R. B. : Highway Research Board.
I. C. S. M. F. E. : Conférence Internationale de Mécanique des sols et des Travaux de Fondation.
I. C. R. M. : Conférence Internationale de Mécanique des Roches.
I. T. B. T. P. : Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics.
R. G. A. : Revue de Géographie Alpine.
R. G. D. : Revue de Géomorphologie Dynamique.
T. L. G. G. : Travaux du Laboratoire de Géologie de Grenoble.
U. S. G. S. : United States Geological Society.
- ACKERMANN (E), 1955. - Zur Unterscheidung glazialer und postglazialer Flies-serden. Geologische Rundschau. Bd 43, Heft 2, p. 328-341.
ACKERMANN (E), 1959. - Der Abstragunmechanismus bei Massenverlagerungen an der Wellenkalk-Schisstufe. Zeitschrift für Geomorphologie, Bd 3, Heft 3.
ALDEN (W. C.), 1928. - Landslides and Flood at Gros Ventre, Wyoming. - Am. Inst. Min. and Met. Eng. Tech. Pub., n° 140, trans, v. 76, p. 347-361.
ALMAGIA (R.), 1924. - Les éboulements en Italie. Matériaux pour l'étude des calamités, n° 2, p. 99-121. Société de géogr. de Genève.
ARIKAN (Y), 1964. - Etude géologique de la Chaîne du Grand Crêt d'Eau-Vuache (Ain, Hte Savoie). Ecl. Geol. Helv., vol. 57, n° 1, p. 1-75.
AVENARD (J. M.), 1962. - La Solifluxion. Trav. du Labo. Geogr. Phys. du centre de Géogr. appliquée de l'Université de Strasbourg, vol. 1.
BAKER (R. F.), 1954. - Analyse of corrective actions for highway landslides. A. S. C. E. Trans., vol. 119.
BARACOS (A.) et MARANTZ (O.), 1953. - Vertical ground movement. Proc. 6° Canadian Soil Mechanics Conférence, Winnipeg.
BARACOS (A.) et BOZUZUK (M), 1957. - Seasonal movement in some Canadian clays. 4° I. C. M. S. F. E.
BARBIER (R), 1953. - Une curieuse forme d'érosion : les entonnoirs d'ablation. T. L. G. G., 30, p. 183-188.
BAULIG (H), 1940. - Profil d'équilibre des versants. Ann. Géogr., p. 81-97.
BEATY (C. B.), 1956. - Landslides and slope exposure. Journ. Geol., v. 64, p. 70-73.
BEAUJOINT (N) et MARTIN (A), 1966. - Observation du comportement d'un talus naturel. 1° I. C. R. M. Lisbonne p. 147-151.
BENDEL (L), 1948. - Ingenieur-geologie ein handbuch für Studium und Praxis. T. II, 6me partie, chap. 1, p. 268-337, Vienne, Springer Verlag.

- BENEVENT et MAURY, 1937. - La catastrophe de Roquebillière. R. G. A., t. XXV, p. 151-157.
- BENSON (W. N.), 1946. - Landslides and their relation to engineering in the Dunedin District (Nouvelle Zélande). Econ. Geol., v. 41, p. 328-347.
- BERNELL (C. E.), 1957. - Properties of moraines. 4° I. C. S. M. F. E., p. 286-290.
- BERSIER (A.), 1955. - Morphologie, structure et dynamique de la zone de glissement de plaques de terrain de Rochette. Soc. Vaudoise Sci. Nat., v. 66, n° 290, p. 187-203.
- BERTHIER (J.), 1964. - Stabilité des talus dans les roches stratifiées. Bull. de liaison Lab. Pont et Chaussées n° 10.
- BINGER (W. V.), 1948. - Analytical studies of Panama canal slides. 2° I. C. S. M. F. E., v. 2, p. 54-60.
- BJERRUM (L.), 1955. - Stability of natural slopes in quick clay. Geotechnique, vol. 5, n° 1, p. 101-119.
- BJERRUM (L.), 1967. - Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales. Proc. A. S. C. E., S. M 5, p. 1 à 47.
- BLACKWELDER (E.), 1928. - Mudflow as a geologic agent in semiarid mountains. G. S. A. Bull., vol. 39, p. 465-480.
- BONTE (A.), 1956. - Le rôle de la géologie dans les travaux de Génie civil. Ann. des Ponts et Chaussées, p. 77-103.
- BONTE (A.), 1959. - La destruction des falaises du Blanc Nez. Soc. Geol. Nord, v. 79, p. 183-184.
- BOSIO (M.), 1952. - Note sur les glissements survenus à Menton les 24-25 avril 1952. R. G. A., T. XL, fasc. IV, p. 681.
- BORDET (C.), 1963. - Déformations anciennes, récentes et actuelles dans les massifs cristallins externes des Alpes françaises. T. L. G. G. 39, p. 173-198.
- BRETH (H.), 1967. - Calculation of the shearing strength of a moraine subjected to landsliding due to reservoir filling in Kauner valley, Austria. Conférence Géotechnique d'Oslo, p. 171-174.
- BUISSON (M. M.), 1952. - Les glissements de la falaise de Sainte-Adresse. Annales I. T. B. T. P., n° 59, p. 1131-1146.
- CAILLEUX et TRICART, 1950. - Un type de solifluxion : les coulées boueuses. R. G. D. n° 1.
- CALEMBERT (L) et DANTINE (R) (1964). - L'avalanche de cendres volantes survenue à Jupille (Liège) le 3 février 1961. Volume d'hommage au professeur F. CAMPUS, p. 41-57.
- CAZENOVE (E. de), 1964. - L'emploi de drains forés pour la stabilisation des talus. Journée de géologie, Ponts et Chaussées de Lyon.
- DERRUAU (M.), 1956. - Précis de géomorphologie. Ed. Masson, Paris.
- DUFFAUT (P.), 1966. - Possibilités et limitations des procédés géophysiques appliqués au Génie civil. Sté Suisse de Mécanique des sols et des Travaux de Fondation. Réunion d'automne à Berne, 4 nov. 1966.
- DUTIL (P.), 1955. - Les glissements de terrains en Algérie - essais de mise au point sur les données actuelles des phénomènes. Trav. sections pédologie et agrologie, Bull. n° 1.

- ECKEL (E. B.) et al., 1958. - Landslides and Engineering practice. H. R. B. sp. report 29, publication 544.
- EMEL'JANOVA (E. P.), 1962. - Sur le caractère périodique des processus de glissement de terrain. Prospection et protection du sous-sol n° 3
- FLORENTIN (J.), 1947. - Etude des glissements des talus argileux. Annales I. T. B. T. P. cir. série D, n° 23.
- FLORENTIN (J.), 1964. - Equilibre des talus naturels. Journées de Géologie-Ponts et Chaussées de Lyon.
- FUKUOKA (M.), 1953. - Landslides in Japan. Proc. 3° I. C. S. M. F. E., p. 234-238.
- FUKUOKA (M) et TANIGUCHI, 1961. - Research on landslides. Proc. 5° I. C. S. M. F. E., p. 603-605.
- GEX, 1931. - L'éboulement du Châtelard (Bauges). R. G. A., T. XIX, p. 499-521.
- GIGNOUX (M.) et MATHIAN (J.), 1951. - Les enseignements géologiques du grand barrage de Génissiat sur le Rhône (Ain-Hte Savoie). T. L. G. G., T. XXIX, p. 122-160.
- GIGNOUX (M.) et BARBIER (R.), 1955. Géologie des barrages et des aménagements hydrauliques. Ed. Masson, Paris.
- GOGUEL (J), 1937. - Les glissements de terrain du Sud Est de la France. Ann. des Ponts et Chaussées, p. 47-60.
- GOGUEL (J), 1943. - Sur une influence possible du reboisement sur les glissements de terrain. C. R. A. S., n° 216, p. 124-125.
- GOLDSTEIN (M. M.) et TER-STEPANIAN (G. D.), 1957. Solidité durable des argiles et fluage profond des pentes. 4° I. C. M. S. F. E., p. 43-51.
- GOULD (J. P.), 1960. - A study of shear failure in certain tertiary marine sediments. A. S. C. E. Research Conference on shear strenght of cohesive soils, p. 615-641.
- GRIM (R. E.), 1962. - Applied clay mineralogy. Mac Graw-Hill, New-York, p. 204-277.
- GUILCHER (A), 1950. - Nivation, cryoturbation et solifluxion quaternaire dans les collines de Bretagne occidentale et du Nord du Devonshire. R. G. D. p. 53 à 78.
- HEIM (A.), 1932. - Bergsturz und Menschenleben. 218 p.
- HOPKINS (M. D.) et WAHRHAFTIG (C.), 1960. Annotated bibliography of English-language papers on the evolution of slopes under periglacial climates. Zeitschrift für geomorphologie, supplement 1.
- HOWE (E), 1909. - Landslides in the San Juan Mountains, Colorado. U. S. G. S. Prof. Papers 67.
- HURTURBISE (J. E.) et ROCHE TTE (P. A.), 1957. - Causes of landslide es revealed by study of Nicolet Disester. Roads and Engineering Construction, p. 82-84-86.
- HURTURBISE (J. E.) et MEYERHOF, 1957. Les éboulements de terrain dans l'Est du Canada. Proc. 4° I. C. M. S. F. E.
- HUTCHINSON (J. N.), 1961. A landslide on a thin layer of quick clay at Furre Central Norway. Geotechnique n° 11 p. 69-94.

- HURTURBISE (J. E.) et MEYERHOF, 1957. - Les éboulements de terrain dans l'Est du Canada. Proc. 4° I. C. M. S. F. E.
- HUTCHINSON (J. N.), 1961. - A landslide on a thin layer of quick clay at Furre, Central Norway. Geotechnique n° 11, p. 69-94.
- HUTCHINSON (J. N.), 1967. - The free degradation of London clay. Conf. Geotechnique d'Oslo, p. 113-118.
- ICHIKAWA (M.), 1959. - On the debris supply from mountain slopes. Proc. of I. G. U. Regional conference in Japan, p. 137-144.
- IVES (R. L.), 1941. - Vegetative indicators of solifluxion. Journal of Geomorphology, vol. IV, n° 2, p. 128-132.
- IWATSUKA (S.), 1959. - On landslides and related phenomena in mountainous areas in Japan. Proc. of I. G. U. Regional Conference in Japan, p. 154-157.
- JONES (F. O.), EMBODY (D. R.), PETERSON (W. L.) et al., 1961. - Landslides along the Columbia River Valley, Notheastern Washington. - U. S. G. S. Prof. Paper 367.
- KJELLMAN (W.), 1955 a) Do slip surfaces exist. Geotechnique, vol. 5, p. 18-22.
- " " 1955 b). - Mechanics of large Swedish landslips. - Ibid., vol. 5, p. 74-78
- " (W), 1955 c). - Effects of ground-water on stability of natural slopes. Ibid., vol. 5, p. 167-169
- KJUNTCEL (V. V.), 1962. - L'érosion des berges de la Moscova et son influence sur les processus de glissement de terrain. Prospection et protection du sous-sol n° 3, p. 42-46.
- KOBOLD (F), 1961. - Measurement of displacement and deformation by geodetic methods. A. S. C. E. Journal of the Surveying and Mapping Division, p. 37-66.
- KRYNINE (D. P.) et JUDD (W. R.), 1957. - Principles of Engineering Geology and Geotechnics. - Mac Graw-Hill.
- KRYNINE (D. P.), 1960. - On the methodology of landslide investigations in Soviet Russia. H. R. B. Bulletin 236, p. 1-16.
- LADD (G. E.), 1935. - Landslides, Subsidence, and Rock-Falls as Problems for the Railroad Engineer. American Railway Engineering Association, Bulletin 37, 72 p.
- LANE (K. S.), 1961. - Field Slope Charts for Stability Studies. Proc. 5° I. C. S. M. F. E., p. 651-655.
- LEUSSINK (H) et MULLER-KIRCHENBAUER (H), 1967. - Determination of the shear strength behaviour of sliding planes caused by geological features. Conf. Geotechnique Oslo, p. 131-137.
- LETOURNEUR (J.), 1966. - Les mouvements du sol, examen des facteurs géologiques de l'instabilité superficielle. - Trav. du Labo de Géol. de l'Ecole des Mines de St Etienne n° 1, 67 p.
- MACAR (P) et LAMBERT (J), 1960. - Relations entre pentes des couches et pente des versants dans le Condroz (Belgique). - Zeitschrift für Geomorphologie supplement 1, p. 129-132.

- MACAR (P.) et FOURNEAU (R.), 1960. - Relations entre versants et nature du substratum en Belgique. Zeitschrift für Geomorphologie, supplément 1, p. 124-128.
- MESSINES DU SOURBIER (J.) et WIDMANN, 1943. - Les glissements de Vailly Lullin (Hte Savoie). R. G. A., 1938, t. XXVI, p. 417-442 et 591-621.
- MESSINES DU SOURBIER (J.), 1948. - Les éboulements dans les gypses ; efficacité des travaux de reboisement. C. R. A. S. n° 226, p. 1295-1296.
- MICHEL (R.), 1961. - Le glissement de terrain de La Motte-Chalancon (Drôme). T. L. G. G., 37, p. 121-127.
- MORET (L), 1943. - Les conditions géologiques des glissements de terrain de Bellevaux (Hte Savoie). R. G. A., t. XXXI, p. 423-428.
- MORET (L.), 1945. - Les éboulements de terrain en montagne. Ed. de la Revue des Alpes, Grenoble, 54 p.
- MORGENSTERN (N), 1963. - Stability charts for earth slopes during rapid draw-down. Geotechnique vol. 13, n° 2, p. 121-131.
- MOUGIN (P.), 1931. - La restauration des Alpes. - Imprimerie Nationale, p. 82-101.
- MONTANDON (F), 1933. - Chronologie des grands éboulements alpins du début de l'ère chrétienne à nos jours. Matériaux pour l'étude des calamités n° 32.
- MUDGE (M. R.), 1965. - Rockfall-avalanche and rockslide avalanche deposits at Sawtooth Ridge, Montana. G. S. A. Bulletin 76 n° 9, p. 1003-1014.
- MULLER (L), 1963. - Die Standfestigkeit von Felsböschungen als spezifisch geomechanische Aufgabe. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, vol. I/I, p. 50-71.
- MULLER (L), 1964. - The rockslide in the Vajont valley. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, vol. II/3-4.
- NEVIERE et BLANCHET, 1955. - Nouvelles contributions à l'étude des mouvements des rives des retenues. 5e Congrès des grands barrages.
- NICOTERA (P.), 1959. - Lo stato di dissesto idrogeologico della penisola calabrese. Geotecnica n° 6
- NONVEILLER (E) et SUKLJE (L), 1955. - Landslide Zalesina. Geotechnique n° 5, p. 143-153.
- ONODERA (T), 1957. - Role of fault on susceptibility of mountain-side to erosion. Ass. Int. Hydro. Sc. Ass. de Toronto n° 1 p. 166-173.
- OSTERMANN (J.), 1960. - Views on the stability of clay-slopes. Geol. Foreningens I, Stockholm LXXXIII, p. 346.
- PARIZEK (E.) et WOODRUFF (J.), 1957. - A clarification of the definition and classification of soil creep. Journal of Geology, p. 653-656.
- PATTE (E.), 1938. - Remarques sur la solifluxion. Le Monde souterrain, n° 24-26, p. 88-94.
- PISSART (A.) et PIRLET (H.). - Bibliographie des ouvrages techniques de langue française intéressant l'évolution des versants. Zeitschrift für Geomorphologie, suppl. n° 1 p. 19-21.
- POPOV (I. V.) et KOTLOV (F. V.), 1961. - The stability of slopes in Trans. Trudy of the F. P. Savarenskii hydrogeology Laboratory, vol. XXXV. Traduction Consultant Bureau.

- RAPP (A.), 1960. - Litterature on slope denudation in Finland, Iceland, Norway, Spitsbergen and Sweden. Zeitschrift für Geomorphologie, supplément 1, p. 33-48.
- REYNOLDS (H. R.), 1961. - Landslides investigations in Russia. Civil Engineering (London), n° 58, p. 608-610 et p. 771-772.
- ROOT (A. W.), 1955. - Correction of Landslides and Slipouts. Trans. A. S. C. E. n° 120, p. 281-289.
- SAITO (M.) et UEZAWA (H.), 1961. - Failure of soil due to creep. Proc. 5° I. C. S. M. F. E., p. 315-318.
- SAITO (M.), 1965. - Forecasting the time of occurrence of a slope failure. 6° I. C. S. M. F. E., p. 537-541.
- SHARPE (C. F. S.), 1938. - Landslides and Related Phenomena. Columbia University Press, 125 p.
- SHARPE (C. F. S.) et DESCH (E. F.), 1942. - Relations of Soil Creep to Earthflow in the Appalachian Plateau. Journal of Geomorphology n° 5, 312-324.
- RYBAR (J.), PASEK (J.), REPKA (L.), 1965. - Dokumentation der systematischen untersuchung der rutschungsgebiete in der Tschechoslowakei. Engineering Geology vol. 1 n° 1.
- SIGAFOOS (R. S.) et HOPKINS (D. H.), 1952. - Soil instability of slopes in regions of perenially frozen ground, frost action in soils. - H. R. B. report 2, p. 176-192.
- SKEMPTON (A. W.) et DELORY (F. A.), 1957. - Stability of Natural Slopes in London Clay. Proc. 4° I. C. S. M. F. E., p. 378-381.
- SOUCHEZ (R.), 1963. - Evolution des versants et théorie de la plasticité. Rev. Belge de Géog., année 87, n° 1, p. 9-94.
- SCHUMM (S. A.), 1964. - Seasonal variations of erosion rates and processes on hillslopes in western Colorado. Zeitschrift für Geomorphologie, supplément 5, p. 215-238.
- SCHUMM (S. A.), 1967. - Rate of surficial rock-creep on hillslopes in western Colorado. Science, vol. 155, p. 560-561.
- SCHNEIDER (B.), 1967. - Moyens nouveaux de reconnaissance des massifs rocheux. Annales I. T. B. T. P., série sols et fondations, n°235-236.
- TAKADA (Y.), 1965. - The geophysical prospecting for landslides ; on the kebio-ka landslide mainly. Bull. of the Disaster prevention research institute, p. 15-27.
- TAKADA (Y.), 1966. - Some problems of internal strainmeter Analysis in a landslide. Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, vol. 15, p. 61-69.
- TAZIEFF (H.), 1960. - A propos de la signification tectonique des importants glissements de terrain provoqués par le grand séisme du Chili de mai 1960. C. R. A. S., t. 251, n° 20, p. 2204-2206.
- TERZAGHI (K.), 1930. - Mechanism of Landslides. Chapitre 4 in Application of Geology to Engineering Practice, G. S. A., Berkey volume, p. 83-123.
- TERZAGHI (K.), 1962. - Stability of steep slopes on hard, unwestered rock. Geotechnique, vol. XII, p. 251-270.

- TER-STEPANIAN (G.), 1960. - Mesurement of the depht creep of slopes. Int. Soc. of Soil Mech. and Found. Eng. regional Conf. New-Delhi.
- TRESKINSKIJ (S. A.), 1959. Estimation préliminaire de la stabilité des pentes dans la taïga montagnaise lors d'observation en avion. Prospection et protection du sous-sol n° 8, p. 43-46.
- VAN BURKALOW (A.), 1945. - Angle of repose and angle of sliding friction, on experimental study. G. S. A. Bull. 56, p. 669-707.
- VARNES (D.), 1950. - Relation of landslides to sedimentary features (in Trask ; Applied Sedimentation, Wiley, N. Y., p. 229-240.
- WARD (W. H.), 1945. - The stability of natural slopes. Geographical journal n° 105, p. 170-197.
- WARD (W. H.), 1953. - Soil movement and weather. Proc. 3° I. C. S. M. F. E. p. 477-482.
- WILLIAMS (P. J.), 1957. Direct recording of solifluxion movements. Am. Journal of Science n° 257 p. 481-490.
- WILSON (S. D.), 1962. - The use of slope measuring devices to determine movements in earth masses. A. S. T. M., n° 322, p. 187-197.
- YAMAGUCHI (S.), 1968. - Geophysical surveys and studies of landslides. Inédit.
- WILLIAMS (P. J.), 1959. - Investigation into processes occuring in solifluxion. Am. Journal of Science n° 257 p. 481-490.

Vu
Grenoble, le
Le Président de la Thèse
R. BARBIER

Vu
Grenoble, le
Le Doyen de la Faculté des Sciences
E. BONNIER

Vu et permis d'imprimer
Le Recteur de l'Académie de Grenoble
M. NIVEAU

