

# TECHNIQUES DE TRAVAIL ET IDÉES DE RECHERCHES

## APPLICATION DE LA MÉCANIQUE DES SOLS A L'ÉTUDE DES VERSANTS

J. M. AVENARD et J. TRICART

(Laboratoire de Géographie Physique, Centre de Géographie Appliquée, Université de Strasbourg)

### ABSTRACT

*Soil mechanics have been developed by the Engineers without any contact with the Geographers, only in order to solve practical problems of foundations. Nevertheless, the methods which have been discovered present a very great interest for geomorphology. Our Science, when correctly orientated, may give a substantial help to the engineers for highway construction, town and railways protection, etc. as the Centre de Géographie Appliquée (Strasbourg) has already shown.*

*In the present paper are given basic definitions of soils mechanics : permeability, plasticity and liquidity limits, shear stress. Their application to the solution of geomorphological problems, mainly those which deal with slope evolution, is exposed from a methodological point of view and with particular examples.*

Dès 1948, un ingénieur brésilien devenu géographe, V. R. LEUZINGER, avait lancé l'idée d'appliquer les méthodes de la mécanique des sols à l'étude des versants. Il était en avance sur son temps et n'a pas été suivi, d'autant plus, il faut bien le dire, que lui-même ne se hasarda point dans la tentative et que sa proposition resta toute académique. C'est dix ans après que nous fûmes à même de la reprendre (1). Après une période de tâtonnements initiaux, car il a fallu faire un choix dans les très nombreuses méthodes employées par les spécialistes de la mécanique des sols, puis adapter celles que nous avons retenues, nous avons remporté des succès suffisants pour nous inciter à cette publication préliminaire.

Nous commencerons par définir les conditions d'application des méthodes de la mécanique des sols aux problèmes géomorphologiques, puis nous exposerons les notions fondamentales de méca-

(1) Ces recherches ont été entreprises grâce à une aide du C.N.R.S., aux crédits octroyés au titre du 3<sup>e</sup> cycle par la Direction de l'Enseignement Supérieur et aux ressources propres du Centre de Géographie Appliquée. Que la Direction de l'Enseignement Supérieur et celle du C.N.R.S. veuillent bien trouver ici l'expression de nos remerciements.

nique des sols aptes à contribuer à les résoudre et, enfin, nous analyserons quelques exemples pris parmi ceux qui ont été étudiés jusqu'à présent par l'un de nous (J.-M. A.) (\*).

### I. DÉLIMITATION DES PROBLÈMES GÉOMORPHOLOGIQUES A TRAITER PAR LES MÉTHODES DE MÉCANIQUE DES SOLS

La mécanique des sols a pour objet l'étude des propriétés physiques qui déterminent le comportement mécanique des roches. Son nom fait intervenir le terme de « sol » avec un sens tout différent de celui des naturalistes qui s'explique d'ailleurs par des raisons historiques. En effet, la mécanique des sols est née des besoins des architectes : lorsqu'il a fallu entreprendre la construction de grands immeubles ou d'ouvrages d'art importants, le problème des fondations s'est posé avec acuité. Les qualités du sol sur lequel il fallait les établir ont constitué une donnée que l'ingénieur s'est attaché à définir avec le maximum de précisions afin d'assurer la solidité de son œuvre. En fait, depuis longtemps déjà, il ne s'agit plus de la surface même du sol, ni même des sols au sens des pédologues; mais des formations géologiques en affleurement, formations superficielles ou même roche en place. On devrait donc parler, plus correctement, de mécanique des terrains, mais l'usage s'est établi chez les techniciens, de donner au mot *terrain* un sens géométrique et géologique qui diffère de celui du mot *sol* qui désigne uniquement un matériau. Par conséquent, les techniciens appellent « terrain de fondation » et par abréviation « terrain », le sol naturel ou rapporté, sur lequel on bâtit. Le mot « sol » désigne seulement le matériau, celui-ci étant soit en place, soit extrait et traité pour être utilisé ailleurs.

L'actuelle mécanique des sols, appelée parfois Géotechnie est, en fait, une branche de la résistance des matériaux, le matériau étudié étant les différents « sols » rencontrés à la surface du globe. Ce que l'on aurait pu autrefois appeler « Mécanique des terrains » n'est donc qu'une partie de l'actuelle

(\*) Nous tenons à remercier ici les ingénieurs du Service des Ponts et Chaussées du Bas-Rhin, pour l'aide et les conseils qu'ils ont bien voulu nous apporter, toujours avec gentillesse.

mécanique des sols appliquée à l'étude du matériau « sol » tel qu'on le trouve en place, c'est-à-dire ni traité, ni extrait.

Les propriétés des terrains auxquelles la mécanique des sols s'intéresse sont très particulières, car cette branche des sciences de l'ingénieur est avant tout pragmatique. Elle a pour objet de définir la résistance à la pression afin de se prémunir contre les affaissements, la stabilité pour éviter les glissements ou les éboulements, accessoirement la perméabilité pour déterminer les conditions de drainage. Initialement destinée à aider les architectes, la mécanique des sols a apporté son appui, surtout depuis la dernière guerre, à d'autres branches de la technique : construction des routes, des aérodromes notamment. En développant le champ de son action, elle s'est attachée à résoudre des problèmes plus proches de ceux que se pose le géomorphologue. Certains d'entre eux sont même typiquement des problèmes de géomorphologie appliquée comme, par exemple, la protection d'une route sur un versant en cours de glissement. Certes, les problèmes auxquels se sont attaqués les techniciens ont un domaine limité : les sols sont étudiés à l'instant précis où ils sont trouvés en place ou reconstitués. Autrement dit, les techniciens du sol considèrent le matériau « mort » tel qu'il leur est présenté ; il est certain qu'ils n'ont pas attaché assez d'importance à « la vie du terrain » à son évolution sous l'influence des circonstances extérieures. Si les géographes avaient été en contact permanent avec les ingénieurs, ils auraient été associés dès le début à des recherches qui sont aptes à renouveler toute une partie de leur discipline et réciproquement ils auraient pu apporter leur concours à des recherches, leur tâche étant d'interpréter les résultats de la mécanique des sols non dans les effets immédiats, mais dans l'évolution future en fonction des phénomènes naturels et des modifications que la nature subit du fait de l'exécution des travaux.

C'est donc la géographie appliquée qui nous a orienté vers ces recherches. Dès 1948, en effet, nous avons été séduits par les idées de V. R. LEUZINGER, mais sans pouvoir les mettre en pratique. C'est l'étude des problèmes géomorphologiques posés par le rétablissement de la route nationale 100 près de Meyronnes (Basses-Alpes), emportée par un glissement de terrain sur plus d'un kilomètre ou par la reconstruction de certains villages endommagés par la solifluxion dans le Queyras qui nous ont fait porter un intérêt immédiat à ces questions. La nécessité de donner une réponse rapide et sûre aux questions posées (il a fallu pour la RN 100, modifier considérablement l'exécution de travaux déjà entrepris) a été pour nous un puissant aiguillon, car il fallait résoudre le problème à tout prix. Simultanément,

la recherche appliquée nous a fourni les moyens nécessaires sur le plan financier (2).

Trois types d'évolution des versants ont retenu notre attention au cours de ces études :

— les versants façonnés par le ruissellement et qui se transforment peu à peu en bad-lands du fait d'un ravinement intense ;

— les versants bosselés par les loupes de solifluxion dont la progression lézarde les constructions, disjoint les murs, dénivèle les routes ;

— les versants découpés en gradins par les glissements en paquets ou éventrés par la formation de coups de cuillère, petites niches de décollement à l'issue desquelles s'observe une langue de boue.

Des levés systématiques de terrain qui ont abouti à l'établissement d'une carte géomorphologique au 1/50 000 des bassins de la Cerveyrette, de l'Ubaye et du Guil, nous ont permis de localiser les phénomènes et de préciser leur occurrence. Elle a été à la base d'un traitement statistique qui sera présenté ailleurs. Ces levés nous ont fait constater les faits suivants :

— Les ravinements en bad-lands affectent des roches argileuses à première vue analogues à celles dans lesquelles se produit la solifluxion en loupes. Tel est notamment le cas des argiles des terres noires oxfordo-callovien de l'Ubaye ou, parfois, de celles du flysch. Un examen plus détaillé du terrain a montré cependant que dans ces formations comme dans les argiles d'altération des schistes lustrés du Queyras, la solifluxion se développait surtout là où existent des placages de moraines. Le problème qui se pose est donc le suivant : quels sont les facteurs qui font que des roches en apparence identiques puissent, selon les cas, évoluer soit par ravinement, soit par solifluxion. Nous avons pensé à des influences climatiques et cru que la fraîcheur de l'ubac, permettant à l'humidité de se conserver, favorisait la solifluxion à l'ubac tandis que la sécheresse durcissant et imperméabilisant le sol, entravant le développement de la couverture végétale, poussait au contraire au développement des ravinements sur l'adret. Dans l'Ubaye, où le contraste adret-ubac est très net, les études

(2) Les investissements effectués pour la mise au point de la méthode que nous présentons se montent à environ 17 900 NF, se décomposant comme suit :

— matériel de laboratoire spécial .....	10 000 NF
— Autre matériel et amortissement des installations générales du laboratoire .....	2 000 NF
— frais de déplacement, amortissement d'une camionnette 2 CV (30 journées à 15 NF pour 2 personnes et 5 000 km à 0,25 NF) .....	2 150 NF
— travail d'un aide de laboratoire .....	750 NF
— bourse du chercheur pendant 1 an .....	3 000 NF

Le calcul de prix de revient ci-dessus ne comptabilise pas l'entretien et l'amortissement des locaux, les frais généraux du laboratoire, le temps du professeur ayant dirigé la recherche ni celui des ingénieurs qui nous ont conseillé.

statistiques faites par L. OTTMANN (3) sous notre direction n'ont pas confirmé cette hypothèse : les ravinements occupent une proportion de la surface totale un peu plus grande sur l'abac que sur l'adret dans le bassin de Barcelonnette. Par contre, dans le Queyras, les loupes de glissement sont plus développées sur les ubacs, où les sols d'altération sont plus épais. Il est vrai que sur les adrets, souvent, les sols ont été détruits par suite de la mise en culture de pentes fortes. Il existe des cas d'adrets qui solifluent, comme celui de Saint-Véran, en grande partie d'ailleurs sous l'effet de l'irrigation. Le problème est donc fort complexe et ne peut être résolu par les seules observations de terrain, même beaucoup plus systématiques et plus détaillées qu'on ne les pratique généralement, grâce aux ressources considérables du travail d'équipe. Il faut analyser les processus en définissant les caractéristiques mécaniques des formations affectées.

— Les mêmes formations sont affectées dans certains cas par la solifluxion en loupes, dans d'autres par les coups de cuillère, dans d'autres encore par les glissements par paquets. Le levé géomorphologique détaillé systématique a permis de reconnaître un certain nombre de lois de localisation. Les glissements par paquets se produisent sur des pentes plus raides que la solifluxion en loupes, généralement supérieures à 25°, toujours supérieures à 20°, tandis que la solifluxion en loupes fonctionne sur des pentes de 12 à 15°. Ils se déclenchent par le pied du versant, sous l'influence d'une action étrangère à l'évolution propre du versant. Dans les conditions naturelles, ils coïncident avec des secteurs où le pied du versant est sapé par un cours d'eau ou avec des secteurs où le torrent creuse rapidement des formations meubles et s'enfonce, ce qui tend dans les deux cas, à accroître la pente du versant. C'est pourquoi nous avons qualifié ces glissements d'*induits*. Au contraire, les coups de cuillère comme les loupes se produisent à partir du haut et gagnent librement vers le bas, exerçant un effort contre les obstacles qu'elles rencontrent : arbres qu'elles basculent, maisons qu'elles lézardent. L'analyse mécanique des déformations subies par les constructions à charpente de bois du hameau du Pasquier d'Arvieux est significative à cet égard : elle révèle une poussée irrégulière du haut du versant vers le bas qui bascule les piliers ancrés sur la roche en place sous-jacente. Il faut donc s'attacher à définir les processus, mis en jeu et déterminer dans quelles conditions apparaissent ces formes différentes que sont les loupes, au mouvement lent et irrégulier, les coups de cuillère, petites coulées boueuses ayant revêtu un caractère soudain lors de pluies exceptionnelles,

glissements par paquets induits par affouillement du pied du versant.

Tous ces phénomènes, cela est connu depuis longtemps, sont propres aux formations argileuses et en rapport avec les modifications des propriétés mécaniques de ces roches en fonction des variations de leur teneur en humidité. Mais les manuels de géomorphologie ne vont pas plus loin et aucun d'eux n'aborde le vrai problème, celui des modalités de l'occurrence de l'eau dans les formations superficielles.

Les ravinements sont liés à un coefficient de ruissellement élevé. Ils se développent dans la mesure où l'eau des averses ne s'infiltré pas et s'écoule presque toute à la surface, ce qui abaisse le seuil de surface à partir duquel les filets d'eau se concentrent suffisamment pour inciser la roche et creuser un ravineau qui, ensuite, contribue à son tour à concentrer le ruissellement et ainsi se développe par autocatalyse. Tout ce qui accentue le ruissellement favorise leur développement : pentes raides, entrave faible de la couverture végétale à la concentration des filets d'eau, faible perméabilité, averses intenses. Les deux premiers facteurs sont du domaine de l'observation géomorphologique courante. Les deux derniers, par contre, touchent à la mécanique des sols. En les réduisant à un schéma, on peut dire que le volume qui ruisselle ( $q$ ) est proportionnel à la différence entre l'intensité de l'averse (hauteur de l'eau recueillie pendant l'unité de temps, soit  $i$ ) et la vitesse de filtration des couches supérieures du terrain ( $v$ ) ou :

$$q = f(i - v)$$

Or, la vitesse de filtration est une caractéristique connue en mécanique des sols. Elle se détermine expérimentalement. Si nous disposions de mesures de vitesse de filtration suffisamment nombreuses et bien réparties dans un bassin-versant et, surtout, de mesures d'intensité d'averses, nous pourrions calculer des coefficients de ruissellement précis, ce qui serait un très grand progrès par rapport aux évaluations actuelles dans lesquelles on confond, avec le ruissellement véritable, l'écoulement subsuperficiel à faible latence, tel qu'il s'exerce dans les bas de versants proches des talwegs. Malheureusement, nous manquons généralement de mesures d'intensité d'averses du fait d'une climatologie trop axée sur les moyennes. Il faut donc limiter provisoirement nos ambitions. Néanmoins, la comparaison des perméabilités, définies à partir de la vitesse de filtration, nous offre un large champ d'explication géomorphologique.

Plus la perméabilité est faible, plus le ruissellement a de chances d'être important. En contrepartie, la quantité d'eau qui s'infiltré est d'autant plus faible. Or, c'est cette quantité d'eau qui, se

(3) A paraître dans les *Mém. du Centre de Documentation cartogr. du C.N.R.S.*

mélangeant aux argiles, modifie leurs propriétés mécaniques, les rendant successivement, au fur et à mesure qu'elle s'accroît, plastiques, puis liquides, et diminuant simultanément leur cohésion. C'est sous l'effet de ces modifications que se déclenchent la solifluxion en loupes, les coups de cuillère et coulées boueuses, les glissements par paquets.

Nous aboutissons donc à la loi suivante : *ruissellement et solifluxion sont deux phénomènes antinomiques, variant en sens inverse en fonction de la perméabilité.* Lorsque la perméabilité est faible, le ruissellement est favorisé. Au contraire, la solifluxion exige une perméabilité minimum pour fonctionner.

Les glissements par paquets et les coups de cuillère, comme les niches de décollements qui caractérisent la zone de départ des coulées boueuses (A. CAILLEUX et J. TRICART, 1950), impliquent une rupture dans la roche, du fait d'un effort de traction supérieur à sa cohésion. En mécanique des sols, on parle d'un effet de *cisaillement*. Dans le cas des coups de cuillère et des coulées boueuses, la rupture provient du fait qu'en profondeur, une couche d'argile s'est suffisamment gorgée d'eau pour devenir liquide et s'est alors mise à couler sur la pente, sous les couches superficielles restées cohérentes. Ces dernières entraînées se sont déchirées du fait de leur entraînement par la base. Le phénomène fait donc intervenir deux notions distinctes : d'une part la résistance, plus ou moins grande des couches superficielles à la rupture (résistance au cisaillement), d'autre part, l'aptitude des couches subsuperficielles à se transformer en boue liquide, capable de s'écouler en profondeur sous l'effet de la sollicitation de la pesanteur. Le passage à l'état liquide est fonction de la teneur en eau et varie suivant les argiles. Il est défini, en mécanique des sols, par la *limite de liquidité*. Il est à noter, d'ailleurs, que lorsque la teneur en eau avoisine la limite de liquidité, la résistance au cisaillement des argiles est très diminuée. Voilà donc deux caractéristiques essentielles qui sont à rapprocher de notions connexes comme la perméabilité. Il faut, en effet, que cette dernière soit élevée pour que des quantités d'eau suffisantes pénètrent dans le sol pour assurer le franchissement de la limite de liquidité. Celui-ci est facilité par l'existence d'un substratum imperméable qui bloque l'infiltration des eaux ayant franchi les couches superficielles. Tel est le cas pour les coups de cuillère qui se sont produits lors de la crue de juin 1957 dans le Queyras. En certains points, du fait des violentes averses et de la fonte des neiges, de fortes quantités d'eau se sont infiltrées en profitant d'une perméabilité élevée, ont été bloquées en profondeur au contact des schistes lustrés et des formations d'altération et ont fait atteindre à la base de ces dernières la limite de liquidité. De la boue liquide s'est alors

écoulée, déchirant les horizons superficiels du terrain, d'où la petite niche de décollement et la langue boueuse qui en sort, étalée sur le versant. Cette perméabilité élevée est parfois le fait d'une autre propriété des argiles : leur aptitude à diminuer de volume sous l'effet de la dessiccation. A. CAILLEUX et J. TRICART (1960) avaient montré dès 1950 que les grandes coulées boueuses des Alpes se déclenchent le plus souvent après une période de sécheresse qui fissure profondément le sol, de sorte que les premières pluies violentes et abondantes s'infiltrent à peu près totalement jusqu'à la base des fissures, aptes à faire franchir, en profondeur, la limite de liquidité. Il est donc intéressant de déterminer expérimentalement l'aptitude des terrains à la fissuration sous l'effet de la dessiccation, c'est-à-dire le *coefficient de retrait*.

Mais ces divers phénomènes ne jouent pas dans le cas de la solifluxion en loupes, qui se produit sous la forme d'un écoulement pâteux à la sollicitation de la pesanteur. Alors que les coulées boueuses et les coups de cuillère se produisent brusquement, d'une manière catastrophique, la solifluxion en loupes se manifeste lentement, avec des vitesses de quelques décimètres par an. Du point de vue mécanique, il s'agit d'une déformation plastique, due au réagencement des particules du corps les unes par rapport aux autres sous l'effet d'une tension due à la pesanteur. La déformation d'une barre de glace posée sur deux chevalets est l'exemple classique d'une déformation plastique. Dans les argiles, le mécanisme ne se produit que lorsque la teneur en eau est suffisante. Une argile sèche n'est pas plastique. Une argile trop mouillée est liquide. Il existe donc une *limite de plasticité*, caractérisée, comme la limite de liquidité, par une certaine teneur en eau, inférieure à celle qui caractérise la limite de liquidité.

Telles sont les diverses notions de mécanique des sols qui s'avèrent intéressantes pour l'étude des phénomènes de ravinement, de solifluxion et de glissement, qui sont parmi les plus importants de ceux que pose le façonnement des versants. Notre analyse du problème ayant permis de le poser dans les termes déjà définis par les ingénieurs spécialistes de mécanique des sols, nous allons maintenant préciser les notions de cette discipline auxquelles nous avons fait appel.

## II. NOTIONS FONDAMENTALES DE MÉCANIQUE DES SOLS INTÉRESSANT LA MORPHOGENÈSE DES VERSANTS

Les notions fondamentales de mécanique des sols auxquelles les problèmes morphogénétiques sont réductibles sont les suivantes : perméabilité, coefficient de retrait, limites de plasticité et de liquidité et résistance au cisaillement. Nous allons maintenant les étudier plus en détail, en rappelant

les définitions qui en ont été données par les ingénieurs et en exposant les méthodes qui permettent d'établir les valeurs numériques qui caractérisent els divers terrains.

#### A. La perméabilité.

« Dans une masse de terre ou de sol, l'écoulement laminaire de l'eau est donné par la formule :

$$v = K. i. »$$

où  $v$  est la vitesse de l'écoulement,  $K$  le coefficient de perméabilité et  $i$  le gradient hydraulique (perte en charge/distance mesurée suivant le sens de l'écoulement).

C'est en 1856 que cette formule a été indiquée pour la première fois par DARCY qui lui a donné son nom. Elle a été établie à la suite d'essais sur du sable fin.

L'objet des essais de perméabilité est d'obtenir  $i$  et  $v$ , ce qui permet de calculer  $K$ . La valeur du coefficient de perméabilité  $K$  caractérise un terrain car elle dépend de tous les éléments constituant ce terrain (porosité, dimension des grains, structure compacité...) pris dans des conditions données (température, viscosité et poids spécifique du liquide...).

*Principe de l'essai* : un sol est placé dans un moule cylindrique et soumis à une charge hydraulique. On mesure le temps d'écoulement d'une certaine quantité d'eau qui traverse l'échantillon placé dans ce moule. Cet échantillon sableux ou argileux, soit intact, soit remanié, a été préalablement saturé, tous les vides du sol étant remplis par de l'eau au moyen d'un système piège à eau-trompe à vide.

Deux méthodes peuvent être employées pour mesurer  $K$  : la méthode à charge variable où l'on fait varier la hauteur de la colonne d'eau, c'est-à-dire la charge hydraulique, en notant le temps écoulé entre les deux niveaux, ou la méthode à charge constante, où l'on recueille l'eau sortant du perméamètre dans une éprouvette graduée en notant le temps nécessaire à l'écoulement d'un volume déterminé (4).

En appliquant alors la loi de DARCY, on en déduit le coefficient de perméabilité cherché.

*Intérêt* : connaître la perméabilité, grâce à cette méthode que les ingénieurs emploient malgré son imprécision (notamment dans le cas de terrain de composition hétérogène) est d'un très grand intérêt pour les géomorphologues étudiant un versant.

Le coefficient de perméabilité est très variable d'un sol à l'autre : un sable peut être plusieurs

(4) Pour tous les modes opératoires, nous renvoyons à un manuel d'essai de laboratoire. On pourra, par exemple, consulter très utilement le *Manuel du Laboratoire routier* de PELTIER (édité par la Laboratoire Central des Ponts et Chaussées).

millions de fois plus perméable qu'une argile. La mesure de la perméabilité permet de passer du qualitatif au quantitatif et de disposer, pour comparer deux formations, de coefficients précis qui se substituent à des notations subjectives. Elle permet aussi de calculer quelle intensité d'averse est nécessaire pour provoquer le ruissellement. L'application de cette notion à l'hydrologie aiderait à rendre cette dernière plus précise et plus concrète. En matière de géomorphologie, la perméabilité détermine la quantité d'eau qui s'infiltré dans une couche et qui peut ensuite lui faire franchir la limite de liquidité ou de plasticité. Par exemple, telle argile qui est sujette au ravinement offre, paradoxalement, un coefficient de liquidité assez médiocre. Si elle ne soliflue pas, c'est qu'elle est très peu perméable et que la quantité d'eau nécessaire pour lui faire franchir la limite de liquidité n'est pratiquement jamais atteinte, faute d'une perméabilité suffisante.

Ainsi, grâce aux essais de perméabilité et aux valeurs numériques qu'ils fournissent, il est possible de préciser la loi de l'antinomie entre le ruissellement et la solifluxion.

#### B. Les limites d'Atterberg.

Aux environs de 1905, le Suédois ATTERBERG s'est attaché à définir des constantes physiques conventionnelles qui marquent des seuils entre différents états d'un sol :

- état solide sans retrait,
- état solide avec retrait,
- état plastique,
- état liquide.

Ces limites entre les différents états ont été dénommées depuis « limites d'ATTERBERG » et se définissent comme suit :

- limite de liquidité :  $L_l$ , passage de l'état liquide à l'état plastique,
- limite de plasticité :  $L_p$ , passage de l'état plastique à l'état solide avec retrait (état friable) ;
- limite de retrait :  $L_r$ , passage de l'état solide avec retrait à l'état solide sans retrait.

Ces limites sont exprimées par « la teneur en eau (en % d'eau par rapport au poids du sol sec) qui amène les sols à un des états de fluidité déterminés : solide, plastique ou liquide » (5). En France, les essais de laboratoire se font sur la fraction de matériel inférieure à 0,500 mm, aux U.S.A. inférieure à 0,416 mm. Voyons plus en détail chacune de ces limites.

*Limite de liquidité* : « la limite de liquidité est la teneur en eau au-dessus de laquelle le sol s'écoule comme un liquide sous l'influence de son propre poids ». Le sol n'a plus aucune cohésion, il se déforme facilement, mais ne se rompt plus par

(5) PELTIER, *Manuel du Laboratoire routier*.

glissement. Un sol à l'état liquide est gorgé d'eau ; chaque grain qui le compose, entouré de son eau adsorbée est isolé des autres par de l'eau interstitielle libre ; il n'y a aucun effet de capillarité.

La liquidité se mesure dans un appareil mis au point par CASSAGRANDE : une coupelle qui peut recevoir des chocs réguliers grâce à un mécanisme et une spatule spéciale. C'est la teneur en eau en % du poids du matériau sec pour laquelle les deux moitiés d'un gâteau de sol, placé dans la coupelle et divisé en deux parties égales par une rainure arrivent à se joindre sur une longueur déterminée sous l'influence d'un nombre déterminé de chocs imprimés à la coupelle. On donne un certain nombre de chocs, jusqu'à ce que les deux lèvres de la rainure se rejoignent à leur base sur une longueur de 1 cm, et l'on détermine la teneur en eau de la pâte qui correspond à ce nombre de chocs. On recommence pour différentes teneurs en eau que l'on porte sur un graphique à échelle arithmétique en fonction du nombre de chocs de fermeture (figures en échelle logarithmique). La courbe que l'on doit obtenir sur ce papier semi-logarithmique est une droite.

La limite de liquidité est, par définition, *la teneur en eau qui correspond à la fermeture de 25 chocs.*

*Limite de plasticité* : « la limite de plasticité est la teneur en eau au-dessous de laquelle les pellicules d'eau entourant les grains n'ont plus la propriété d'eau libre » (6). Un sol à l'état plastique contient donc suffisamment peu d'eau libre interstitielle pour que les films d'eau adsorbés autour de chaque grain se rejoignent et lubrifient les contacts entre les grains ; les tensions capillaires sont déjà très sensibles.

Il n'y a pas d'appareillage spécial pour mesurer la limite de plasticité : c'est la teneur en eau exprimée en % du poids du matériau sec du fuseau de sol qui se brise en petits tronçons au moment où son diamètre atteint 3 mm.

*Indice de plasticité* : l'indice de plasticité est la différence entre les deux limites : il donne la mesure de l'étendue de la zone pour laquelle le matériau est plastique et est susceptible de grandes déformations :

$$I_p = L_l - L_p$$

Il est en relation avec la quantité d'argile et de colloïdes que renferme le sol.

*Limite de retrait* : la limite de retrait est la variation de volume d'un échantillon en fonction de sa teneur en eau. On constate en effet que lorsque la teneur en eau décroît, le volume décroît linéairement, puis brusquement cesse de décroître, alors que la dessiccation se poursuit. Le contraire se produit en humidifiant. La définition

de la limite de retrait s'énonce « la limite de retrait est la teneur en eau à partir de laquelle le volume de l'échantillon cesse de diminuer quand la teneur en eau décroît ou commence à augmenter quand la teneur en eau croît » (Peltier, *op. cit.*).

L'état solide est donc caractérisé par très peu d'eau. Lorsqu'il n'y a plus beaucoup d'eau adsorbée, les grains sont près les uns des autres, ils entrent en contact, les frottements internes font disparaître la plasticité et les effets de capillarité augmentent. Lorsque tous les grains ne sont pas encore en contact, la dessiccation peut produire encore une diminution de volume : c'est l'état solide avec retrait. Lorsqu'il y a contact parfait, entre les grains, on atteint la limite de retrait, au-dessous de laquelle il y a un état solide sans retrait.

*Intérêt des limites d'Atterberg* : les limites d'ATTERBERG en mécanique des sols servent essentiellement à caractériser un sol du point de vue physique et peuvent préciser la dénomination et la classification des sols. Pour l'étude des versants d'un point de vue géomorphologique, nous avons utilisé ces limites dans un sens un peu différent, assez rarement employé par les ingénieurs : nous avons comparé la teneur en eau d'un sol à l'état naturel avec les limites d'ATTERBERG. Un sol dont les limites de plasticité et même de liquidité sont faibles les franchit plus facilement lors des pluies et peut solifluer alors qu'un sol dont les limites sont élevées doit recevoir et emmagasiner une quantité d'eau plus importante pour se comporter de la même manière. La connaissance de ces limites permet d'expliquer de nombreux cas de solifluxion ou de les prévoir sur des versants où des aménagements sont en cours d'étude. L'installation de drains sur certains versants pour les stabiliser peut avoir l'effet contraire : la solifluxion se poursuivant, les drains sont disjoints et une forte concentration d'eau se produit par places. Elle est susceptible de faire franchir au sol la limite de liquidité ou même simplement celle de plasticité et, ainsi, d'accroître le mouvement de terrain que l'on voulait arrêter.

Dans un ordre d'idée, on peut confronter les limites d'ATTERBERG avec d'autres propriétés du sol, et plus particulièrement avec la perméabilité. Certains sols dont les limites d'ATTERBERG sont peu élevées ne solifluent pas parce que leur perméabilité est extrêmement faible, l'eau n'ayant pas le temps de s'infiltrer et d'atteindre ces valeurs le sol n'a pu se détremper.

Les limites d'ATTERBERG peuvent aussi s'appliquer aux phénomènes périglaciaires. Lors du dégel, l'eau du sol, parfois concentrée en amas de glace, fond rapidement de haut en bas, tandis qu'une couche de sol gelé persiste en profondeur. Celle-ci étant imperméable, il peut ainsi se produire de

(6) J. VERDEYEN, *Mécanique des sols et fondations* (Editions Desoer, Liège ou Eyrolles, Paris).

très fortes concentrations d'eau dans les horizons superficiels, qui font que les limites de liquidité ou de plasticité sont dépassées. La solifluxion rencontre alors des conditions idéales. Dans les pays à pergélisol, elles persistent tout l'été, puisque la couche imperméable profonde est permanente. Ainsi s'explique-t-on que la solifluxion puisse affecter, lors du dégel, des formations qui en sont indemnes lors des autres saisons.

De même, la limite de retrait a son intérêt, certaines argiles se craquelant l'été, laissant « passer » l'eau lors des premières pluies suivant la période de sécheresse, alors qu'en d'autres conditions elles sont imperméables. Il peut se produire le long de ces fentes des accumulations locales où la teneur en eau dépasse les limites de liquidité ou de plasticité et le versant peut évoluer par solifluxion.

### C. La résistance au cisaillement.

#### a) Définitions.

Avant d'entreprendre l'étude de la résistance au cisaillement, rappelons quelques définitions fondamentales.

**Tension :** « une tension ou contrainte est une force rapportée à l'unité de surface ». La tension étant généralement oblique par rapport à l'élément correspondant, on peut la décomposer suivant la normale à cet élément et suivant la projection sur l'élément. Les deux composantes ainsi obtenues sont appelées *tension normale* et *tension tangentielle*.

**Cohésion :** la cohésion d'un matériau est la force d'attraction propre au matériau qu'il faut d'ailleurs diviser en cohésion vraie et cohésion apparente. La cohésion vraie dépend des phénomènes d'attraction moléculaire qui se manifestent entre les particules. Ces phénomènes n'existent que si les grains sont petits et présentent ainsi une grande surface spécifique. La cohésion apparente ou d'humidité résulte d'une tension superficielle de l'eau se trouvant dans les petits espaces laissés entre les grains. La cohésion totale est la somme des deux.

**Angle de frottement interne :** l'angle de frottement interne est l'angle que ferait la tension entre deux grains d'un matériau, avec la normale, au petit élément de surface de contact entre ces deux grains, si la cohésion n'existait pas. Autrement dit, c'est l'angle à partir duquel il y aurait glissement entre les deux grains.

La tension normale sert à rapprocher les grains, les uns des autres ; la tension tangentielle est celle qui est compensée par la force de frottement, c'est-à-dire par la résistance qui s'établit au contact des deux grains, pour les empêcher de glisser l'un sur l'autre. Il est évident alors que la tension tangentielle ne peut exister que dans la phase solide.

#### b) Equilibre et rupture des terres : le cisaillement.

Une partie importante de la mécanique des sols a pour but d'étudier l'équilibre des terres, c'est-à-dire de façon générale les critères de la résistance des matériaux ; « établir les relations auxquelles doivent satisfaire les éléments qui définissent l'état de contrainte en un point, pour qu'en ce point la matière ne dépasse pas certaines conditions limites au-delà desquelles par exemple il y aurait rupture » (J. VERDEYEN, *op. cit.*).

Une relation est la base de toutes les théories relatives à l'équilibre des massifs de terre ; la relation de COULOMB qui s'énonce :

$$S = C + N \operatorname{tg} \hat{u}$$

où C est la cohésion du massif considéré,  $\hat{u}$  l'angle de frottement interne, S la tension tangentielle et N la tension normale.

Lorsque le sol est sur le point de se rompre par glissement, cette relation nous donne la façon dont sont liées tension tangentielle et tension normale.

La tension tangentielle est la *force de cisaillement*.

**Principe de l'essai :** nous venons de voir que la résistance au cisaillement S est liée à la cohésion C, à l'angle de frottement interne  $\hat{u}$ , et à la pression extérieure ou tension normale N par la relation :

$$S = C + N \operatorname{tg} \hat{u}$$

L'essai de cisaillement consistera donc à déterminer les valeurs de la cohésion et de l'angle de frottement interne dans les conditions de teneur en eau et de consolidation connue. Cette restriction sur la teneur en eau est en effet très importante : si généralement  $C = 0$  pour les sables, ce qui permet de supposer dans la pratique que l'angle de frottement interne est indépendant de la pression et est égal à l'angle du talus naturel, le problème est beaucoup plus complexe pour les matériaux doués de cohésion. La cohésion dépend en effet, par définition, de la teneur en eau du sol : quand la cohésion décroît, c'est que la teneur en eau croît. De même, l'angle de frottement interne dépend de la possibilité d'évacuation offerte à l'eau.

Trois types d'appareils sont généralement employés pour faire ces mesures : boîte de cisaillement ; appareil à cisailier par rotation ; appareil à pression triaxiale. Nous avons employé pour nos essais l'appareil à boîte de cisaillement. Cet appareil comprend deux demi-boîtes se joignant sur un plan horizontal, l'échantillon est placé dans cette boîte et est consolidé par charge verticale. La partie supérieure de la boîte est mobile et est raccordée à un système qui permet une traction horizontale. Un effort de traction peut ainsi être effectué jusqu'à la rupture.

Répétant l'essai pour différentes charges, on porte sur un diagramme (abscisse : tension nor-

male, ordonnée : tension tangentielle de rupture) les résultats obtenus et l'on obtient une droite dont l'inclinaison sur l'horizontale est la mesure de l'angle de frottement interne et l'ordonnée à l'origine, la cohésion.

*Applications.* En confrontant sur un versant l'angle du talus naturel de ce versant, soit  $i$ , et l'effort tangentiel  $S$  tel que nous venons de le définir, plusieurs cas peuvent se présenter, indiquant si le versant est stable ou s'il existe des risques de rupture par cisaillement.

Si  $i$  est inférieur à  $S$  : l'équilibre existe, le versant est stable, il n'y a aucun risque de rupture.

Si  $i$  est supérieur à  $S$  : l'équilibre est rompu et la tension tangentielle étant la plus forte, il y a risque de rupture.

Si  $i$  est à peu près égal à  $S$  : l'équilibre est extrêmement instable, de légères modifications peuvent entraîner la rupture : modification de la teneur en eau par exemple.

La résistance au cisaillement est ainsi d'un très grand intérêt pour le géomorphologue s'occupant de l'étude de versants : c'est le cas en particulier d'un versant sapé à sa base par une rivière. L'angle du talus naturel se trouve augmenté par ce sapement et  $S$  risque d'être dépassé : le versant qui était stable avant le sapement de la berge se remettra en marche si  $S$  est atteint ; or, dans de nombreux cas, il est utile de connaître le seuil à partir duquel le risque de reprise de l'évolution du versant pourra se manifester.

L'emploi de ces méthodes permet d'avoir des phénomènes de solifluxion, d'éboulement et de glissement une vision précise qui n'est plus subjective ou conjectural. Il permet de définir un état de stabilité, une pente limite et de lui comparer la pente réelle, donc d'apprécier le potentiel d'évolution. Il devient ainsi possible, non seulement d'expliquer quantitativement les phénomènes qui se déroulent sous nos yeux, mais aussi de les prévoir. C'est là que la géomorphologie dynamique, devenue quantitative, est une science appliquée. Définissant les caractéristiques mécaniques d'un versant, elle permet de juger de sa stabilité, de prévoir les risques de glissement ou de solifluxion et de proposer des solutions pour empêcher leur déclenchement. C'est de cette manière que le Centre de Géographie Appliquée collabore avec les Ponts et Chaussées et le Génie Rural pour protéger des agglomérations, pour sauvegarder des installations agricoles, pour éviter des coupures de routes. Aussi, allons-nous donner quelques exemples d'application de ces méthodes.

### III. QUELQUES EXEMPLES D'APPLICATION DES MÉTHODES DE MÉCANIQUE DES SOLS AU PROBLÈME DES VERSANTS (7)

Nous prendrons ici un exemple de chacune des

(7) Tirés de la thèse de J.-M. AVENARD, en préparation.

méthodes que nous venons d'exposer. Mais ce cloisonnement ne doit pas nous faire oublier que la plupart des actions sont liées, que les interactions sont nombreuses et que ce ne sont que des caractères dominants qui ont guidé un découpage destiné seulement à clarifier l'exposé.

Il est indispensable en effet de ne pas se limiter à des études séparées des caractéristiques de chaque couche d'un terrain ni à celles d'un seul processus possible. Il faut analyser leurs combinaisons. Les actions n'agissent pas toujours dans le même sens ; ainsi la perméabilité d'un sol diminue d'abord le ruissellement, donc aussi les ravinements, mais si la surface du sol se gorge d'eau (couche inférieure argileuse, sous-sol gelé en profondeur), sa résistance au cisaillement diminue et il peut arriver que la perméabilité devienne un facteur favorable à l'érosion, contrairement à ce qui se passait initialement.

#### A. Action dominante de la perméabilité.

##### 1. Sol de faible perméabilité.

Lors de notre étude de la vallée de l'Ubaye, après la crue de juin 1957, nous avons été frappés par l'évolution du versant droit de la vallée entre le cône du Riou Bourdou et Barcelonnette. Tout le pied de ce versant évolue en bad-lands, parfois très incisés, dans un matériel noirâtre, constitué de schistes marneux, désagrégé en surface et jusqu'à une profondeur variable. Ces terres ont été appelées « Terres noires de Barcelonnette ».

Le problème était pour nous de voir pourquoi ce matériel décomposé ne soliflue pas, et pourquoi l'évolution actuelle est du type bad-lands.

Les limites de liquidité (28,3 %) et de plasticité (24,4 %) sont peu élevées et devraient facilement être atteintes lors des pluies ou lors d'un dégel. Pourtant, nous avons pu déterminer la teneur en eau du sol au moment d'un dégel et cet essai nous a donné une teneur en eau de 22,3 %, soit moins que la limite de plasticité. L'explication de ce phénomène nous est fournie par les essais de perméabilité : la perméabilité de ces terres est en effet très faible : 0,009 cm/m. Ceci, allié à la forte pente du versant, nous laisse supposer que l'eau n'a pas le temps de s'infiltrer, qu'elle ruisselle en ne « mouillant » que la partie supérieure du sol.

Essayons de retracer l'évolution de ce versant.

Nous sommes ici sur un adret à forte pente : la végétation ne peut que difficilement se développer par suite de la sécheresse de l'été. L'eau de pluie ou de fonte des neiges ruisselle, entraînant le sol mince qui pourrait se constituer ; cette évolution est irréversible car plus le sol s'amincit, moins il y a imbibition de l'eau et plus il y a tendance au ruissellement. Sans doute le surpâturage par les moutons du XIV<sup>e</sup> au XV<sup>e</sup> siècle a-t-il accentué encore cette évolution.



Lors d'une arrivée d'eau sur ce versant, il y a lieu de distinguer, en fait, deux phénomènes complémentaires : en surface sur une épaisseur de 1 à 2 cm, l'eau imbibe le sol et la limite de liquidité est atteinte ; les particules arrachées par l'impact des gouttes de pluie ou par l'érosion mécanique, gel par exemple, sont soit entraînées par l'eau qui ruisselle, soit transportées par une reptation originale, caractérisée par un glissement des particules à la limite de la liquidité, qui laisse la surface du sol particulièrement lisse. Mais la faible perméabilité et la pente forte empêchent l'eau de continuer de s'infiltrer dans le sol au-delà de 2 cm de profondeur, et la quasi-totalité de cette eau ruisselle, se concentre là où des particules peuvent être enlevées plus facilement et il se forme ainsi des ravins qui amorcent les bad-lands. Le reste du versant évolue en creep en fonction de ces lignes de moindre pente où l'eau, ne pouvant s'infiltrer, se concentre. Les versants de ces ravins reculent alors parallèlement à eux-mêmes, la pente ne diminue pas, ce qui empêche l'eau de stationner plus longtemps, élimine une plus forte imbibition et, par suite, la possibilité de franchissement des limites de liquidité et de plasticité. Il semble que lorsque ces ravins sont amorcés, la seule évolution possible soit le bad-land.

## 2. Superposition de deux couches de perméabilité différente.

La route N 94, longeant la Durance, entaille le pied du versant, sur son bord gauche (sens de la Durance) à l'aval du hameau des crottes, situé juste en amont du barrage de Serre-Ponçon. Un décollement important s'est produit à environ 700 mètres du hameau.

La coupe de la route montre la superposition de deux matériaux différents : à la base, la roche en place qui est un schiste noirâtre, compact, au sommet une moraine peu épaisse (2 à 3 m au maximum). Cette coupe est, par ailleurs, en partie recouverte par le matériel morainique qui soliflue et semble provenir du haut du versant : des lambeaux de sol identique à celui qui recouvre le versant reposent sur l'éboulis fossilisant la coupe.

Nous avons fait deux essais de perméabilité : l'un dans le matériel morainique, l'autre dans le matériel sous-jacent. La différence de perméabilité de ces deux formations est très grande ; alors que le schiste a une perméabilité pratiquement nulle puisqu'aucune eau n'est passée lors de l'essai pendant une période de 12 heures, la moraine par contre a une perméabilité élevée : 0,58 cm/m. La perméabilité est donc d'environ 1 000 fois supérieure dans la moraine. Il se produit ainsi, lors des pluies, une concentration d'eau le long du plan de contact des deux formations. En outre, les limites de liquidité et de plasticité de la moraine sont relativement peu élevées :  $L_l =$

38,8 % ;  $L_p = 30$  %. Ces valeurs peuvent facilement être atteintes le long du plan de contact. A la moindre pluie, l'eau s'infiltré dans la moraine et, se trouvant arrêtée dès qu'elle arrive au contact du schiste, la limite de liquidité est très rapidement dépassée : tout le matériel morainique « glisse » sur ce plan liquéfié. Ce phénomène peut se poursuivre plusieurs jours après les averses, du fait de l'écoulement subsuperficiel le long du versant. Ainsi, lorsque nous avons déterminé, sur place, la teneur en eau de la moraine, elle était encore de 39,9 %, alors qu'il n'avait pas plu depuis plusieurs jours. Elle dépassait la limite de liquidité.

Un véritable mouvement en masse de toute la surface du versant se produit. Lorsque cette masse arrive sur la coupe due à l'entaille de la route, elle se trouve mise en surplomb, et s'écoule pour former l'éboulis recouvrant le pied de l'entaille ; des paquets de sol consolidés par la végétation se détachent du reste du versant, et viennent grossir la masse de l'éboulis.

L'entaille relativement récente du talus de la route comparée à la masse du matériel morainique déjà soliflué nous montre que ce phénomène continue d'évoluer actuellement et de façon extrêmement spectaculaire.

Ces deux exemples nous prouvent l'importance essentielle que peut avoir la perméabilité dans l'évolution d'un versant : on peut dire que la perméabilité est presque toujours à la base de cette évolution ; elle n'agit pourtant pas seule puisque nous venons de voir que le mouvement était rendu possible par les limites de liquidité et de plasticité relativement faibles. Voyons quelques exemples où il sera possible de mieux dégager l'influence de ces limites.

## B. Influence des limites d'Atterberg.

### 1. Limite de liquidité.

La route D 63 dans le département du Jura (1/8 sud-ouest de la feuille 1/50 000 Saint-Claude) après être passé au-dessus du ruisseau de Longviry, sous le « Bois de la Versanne » remonte sur le flanc droit de la vallée et traverse 200 mètres environ après le pont, une formation qui est une moraine éboulée, coincée entre des affleurements de calcaires. Les abords de la route sont protégés en contrebas de celle-ci par un grillage et au-dessus par un ouvrage en béton. Deux phénomènes semblent ici faire évoluer ce versant : des éboulements, de faibles importance, se caractérisant surtout par des chutes de pierres (que nous n'examinerons pas dans ce paragraphe) et une solifluxion plus importante de toute la masse.

Les limites de liquidité et de plasticité sont extrêmement faibles dans cette moraine :  $L_l = 16,4$  et  $L_p = 14,8$  %. Par contre, la perméabilité est très forte puisqu'elle est de 0,8 cm/m. La pente en cet endroit est de l'ordre de 25 à 30°. Mais il

semble que les calcaires sous-jacents sont très fissurés et permettent à l'eau de s'infiltrer rapidement.

Lors des pluies, l'eau s'infiltré et malgré la forte perméabilité, la limite de liquidité est atteinte, car elle est extrêmement faible et toute la masse amorce un lent mouvement vers le bas de la pente. Ce mouvement ne dure pourtant pas longtemps car, au bout de quelques heures, une grande partie de l'eau s'évacue par infiltration dans les calcaires diaclasés. Nous avons pu préciser ce fait car nous avons trouvé une teneur en eau de 11 % seulement quelques heures après une pluie importante.

Il semble donc que cette solifluxion soit due au fait que la limite de liquidité se trouve dépassée pendant quelques heures après des pluies plus ou moins fortes. Elle serait typique d'une solifluxion sur forte pente par limite de liquidité, et où le matériel serait suffisamment tenace pour ne pas former de niche de décollement visible. Des essais complémentaires permettront sans doute de le préciser.

### 2. Limite de plasticité.

Dans le Jura suisse, la route N 5, reliant Lausanne à Yverdon, traverse dans le canton de Vaud, à 6 kilomètres au Sud d'Yverdon, une formation molassique sablo-argileuse. De nombreux glissements se produisent dans la prairie en bordure de la route, attestés par des boursoufflures. La pente du versant est faible, de 5 à 10°. Il n'y a pas de niches de décollement.

Cet échantillon apparaît comme très important car une première constatation se dégage des essais : la limite de liquidité ne peut être atteinte. La teneur en eau à saturation complète n'étant que de 38,6 %, alors que la limite de liquidité est de 48,2 %. Par contre, cette molasse n'est pas épaisse et repose sur une formation plus imperméable qu'elle. Sa perméabilité est très grande puisqu'elle est de 1,4 cm/m.

Lors des pluies, la forte perméabilité et la faible épaisseur de cette molasse ont pour effet de gorger cette formation d'eau. La limite de plasticité est alors atteinte (37,3 %) et l'épais manteau herbeux retient l'eau suffisamment longtemps pour que la solifluxion ait le temps d'agir. Bien qu'à notre connaissance il n'y ait pas eu de pluie le jour de la prise de l'échantillon, la teneur en eau du sol était encore de 36 %, soit presque la limite de plasticité.

L'étude de cet échantillon sera poursuivie, mais il semble dès à présent qu'il offre un très grand intérêt, car il permettra de voir l'évolution d'un versant où seule la limite de plasticité peut être atteinte.

### 3. Rôle de la limite de retrait.

Cet exemple a été pris dans le Jura, près de

Clairvaux-les-Lacs. Sur la route D 27, entre Vertambôz et Charezier, après le passage de l'affluent de la Syrène venant de Vertambôz, tout le versant est affecté par d'importantes loupes de glissement. Ce phénomène est particulièrement spectaculaire dans la ligne droite de la route à flanc de coteau, à l'orée du petit bois.

Tout ce versant est entaillé dans des argiles à varves. La solifluxion généralisée de tout cet ensemble pose un problème pratique car elle atteint la route qui s'affaisse régulièrement et les services des Ponts et Chaussées doivent la « consolider » périodiquement et sans succès durable.

Ce versant montre un glissement par paquets, régulièrement réparti, à la manière de vagues : ce ne sont en effet que des coups de cuillère répétés sur toute la surface. La majorité des arbres et des buissons sont basculés, montrant que les glissements se sont produits brusquement.

Mais un examen plus approfondi nous fait découvrir d'autres arbres, certes plus rares, qui ont pris une allure courbe, montrant qu'ils se sont adaptés à une solifluxion assez lente.

Il semble donc que deux phénomènes se juxtaposent :

- une solifluxion diffuse de la masse,
- une solifluxion brutale, par paquets, avec rupture.

#### a) Solifluxion diffuse de la masse.

Sur ce versant bien exposé (sud-ouest), les fentes de retrait jouent un rôle important (limite de retrait : 15,5 %). Lors d'étés secs, les argiles à varves se craquèlent en surface offrant des fentes de retrait de faibles dimensions, mais généralisées. Les pluies venant après ces périodes de sécheresse peuvent alors facilement s'infiltrer, ce qui nous est confirmé par la forte perméabilité, fait rare dans des argiles (0,348 cm/m). Cette imbibition de la masse en surface et jusqu'à une faible profondeur permet d'atteindre très rapidement la limite de liquidité qui est de 29 %. Lors d'une pluie en novembre, au moment de la prise de l'échantillon, nous avons pu déceler 46 % d'eau dans le sol, ce qui montre bien que la limite de liquidité était largement dépassée.

Il se produit un jeu des varves suivant leurs stratifications, et des déformations se produisent, obligeant les arbres à suivre le mouvement vers le pied du versant. Pourtant, la forte infiltration due à la perméabilité élevée ne permet pas à ce processus d'agir très longtemps. Il est remplacé par une solifluxion due à la plasticité ( $L_p = 20,4\%$ ), qui agit beaucoup plus longtemps, mais s'arrête dès que revient une autre période sèche : les arbres ont alors le temps de s'adapter.

#### b) Solifluxion par paquets.

Une faible partie de l'eau arrivant sur ce versant disparaît par évaporation, le reste s'infil-

trant en profondeur. Il suffit alors que cette eau rencontre un horizon plus imperméable (profondeur à laquelle les fentes de retrait ne jouent plus par exemple) pour que la limite de liquidité soit dépassée en cet endroit. Une fente de retrait plus importante ou une zone de moindre résistance dans le plan vertical peut alors délimiter un paquet qui, ainsi entouré d'un bord boueux et semi-liquide, glissera et se rompra facilement. Cette rupture est brusque par rapport à la solifluxion diffuse de la masse, les arbres ne peuvent plus s'adapter, ils prennent l'allure penchée décrite plus haut. Ce processus plus spectaculaire et de plus grande envergure que le premier donne l'allure générale du versant, bosselé et en marches d'escalier, car les foirages se répètent en différents endroits.

C'est ainsi que la route se trouvant à peu près au sommet de cette zone de glissements, est atteinte par eux. Lors de fortes pluies, un paquet comprenant dans son plan un tronçon de la route peut glisser, la rupture verticale étant très souvent facilitée par l'excès d'eau dans le caniveau.

Etant donné l'ampleur de ce mouvement, une protection efficace de la route semble difficile, les crédits employés à sa réfection périodique seraient mieux utilisés à l'établissement d'un nouveau tracé.

### C. La rupture par cisaillement.

La route N 436, reliant Thoirette à Bourg, dans le Jura fait une magnifique épingle à cheveux entre Corveissiat et l'abbaye de Selignac, dont l'axe est orienté Nord-Sud, et occupé par un ruisseau de faible importance. La branche ouest de cette épingle à cheveux se présente comme une suite de petites croupes séparées les unes des autres par l'entaille de ruisseaux dont le fonctionnement est très intermittent.

La route passe au pied de ces croupes, recoupant le bas de la pente en certains endroits. Le matériel de ce versant résulte de l'altération de calcaire sous-jacent, d'une épaisseur considérable.

Au printemps de l'année 1959, vers Pâques, après de fortes pluies, des décollements importants se sont produits en deux endroits où la route entaillait le pied de ce versant recouvrant en partie la route et interrompant la circulation. Le reste du versant, où semble avoir agi une solifluxion périglaciaire, est stable actuellement : peu d'arbres courbés, aucun basculé. Seuls des décollements plus anciens s'observent au bord de la route.

La perméabilité relativement faible de cette formation (0,018 cm/m) ainsi que la pente du versant, qui est de 25 à 27° en moyenne, ne permettent pas d'atteindre la limite de liquidité qui est de 38,4 % : l'eau s'infiltré difficilement, elle est de plus retenue par la couverture herbeuse très abondante. Au moment des averses, la plus grosse partie de l'eau ruisselle entre les touffes, l'autre partie est retenue par ces touffes et n'est « donnée » au sol que progressivement : la végétation joue le rôle de régulateur et la limite de plasticité elle-même n'est pas atteinte pendant suffisamment de temps pour avoir la possibilité d'agir ( $L_p = 23,9 \%$ ).

Quel est alors le processus qui permet les décollements du pied de ce versant ? L'entaille due à la construction de la plateforme de la route a, en de nombreux endroits, porté la pente au-delà de 27°, parfois jusqu'à 30°.

Or, l'angle de frottement interne du matériau et, par suite, l'angle d'équilibre de ce versant n'est que de 27°, avec une teneur en eau légèrement supérieure à la limite de plasticité. Les endroits où l'angle dû à l'entaille de la route était supérieurs à 27° se trouvent ainsi en équilibre instable : il a alors suffit d'une pluie de plusieurs jours, pour que la teneur en eau augmente localement, et pour que l'équilibre soit rompu ; la rupture s'est faite brusquement par cisaillement.

Par la suite, ces décollements continuent d'évoluer car la végétation ne recouvre plus toute la surface, et les lambeaux de sol laissent des parties à nu : l'abaissement de la pente permet en outre dans ces décollements, à l'eau de stationner plus longtemps, donc de s'infiltrer plus facilement, et l'évolution se fait par glissement car la limite de plasticité est dépassée.

Il se produit un appel au vide dans la zone de départ de ce premier décollement. L'angle du talus se trouve augmenté, un cisaillement a lieu alors au-dessus. Tout le versant risque aussi d'être affecté par une sorte d'érosion régressive.

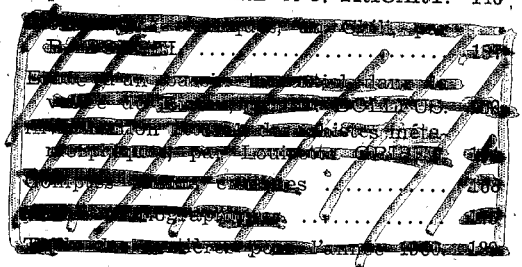
Ainsi, la remise en marche de ce versant est due à une cause anthropique : l'augmentation de la pente au pied du versant par la construction de la route. Les études faites grâce à cette méthode de mécanique des sols permettent là encore de résoudre des problèmes de géomorphologie appliquée, en même temps qu'elles développent notre connaissance théorique.

# Revue de GÉOMORPHOLOGIE DYNAMIQUE

## Sommaire :

2

Techniques de travail et idées de recherches. Application de la mécanique des sols à l'étude des versants, par J. M. AVENARD et J. TRICART. 146



REVUE MENSUELLE

Nos 10-11-12 U.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire XI<sup>e</sup> ANNÉE  
Octobre-Décembre 1960  
N° 28504