

## Sensibilité aux mouvements en masse (solifluxion)

Jean-Michel AVENARD

UFR de Géographie. ULP-Strasbourg I, 3, rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg Cedex

### RÉSUMÉ

*Les mouvements en masse ou solifluxion sont des phénomènes, fréquents sur les versants, qui se produisent soit lentement soit rapidement et qui en affectent l'ensemble ou seulement quelques portions particulières. Si le comportement de l'eau dans les formations superficielles est incontestablement l'élément moteur, en fonction des conditions climatiques et du site géomorphologique, de nombreux autres facteurs, et leurs interrelations, entrent en jeu et font que le phénomène peut prendre des formes complexes et variées, ce dont cherche à rendre compte la typologie que nous proposons. Ainsi, au-delà de certaines valeurs caractéristiques qui peuvent être obtenues par la mécanique des sols, d'autres données sont encore à établir avec plus de précision, comme le rôle de la nature des argiles ou celui de la matière organique ou de la teneur en certains éléments (oxydes de fer, carbonate de calcium, gypse...). La lutte contre les effets des mouvements en masse n'en est que plus délicate.*

MOTS-CLÉS : Mouvements en masse — Solifluxion — Limites d'Atterberg — Angle de frottement interne — Perméabilité — Site géomorphologique — Dynamique actuelle — Lutte anti-érosive.

### ABSTRACT

#### LAND SENSITIVITY TO MASS MOVEMENTS (SOLIFLUCTION)

*Mass movements, also called solifluction, are frequent on slopes where they occur either slowly or quickly, affecting them as a whole or on some parts only.*

*If, according to climatological conditions and the geomorphologically active site, the behaviour of water in the surface deposits forms undeniably the decisive factor, numerous other forces with their interrelations come into play. All these elements act in such a way that the process can take complex and diversified forms of which the suggested typology tries to account for.*

*Thus beyond some typical values which can be managed by means of soil-mechanics, other data ought to be worked out with more accuracy like the part of the nature of clays, that of the soil organic matter or of certain elements content (i.e. iron oxides, carbonate of calcium, gypsum...). Control measures against mass movement effects get more especially delicate to handle.*

KEY WORDS : Mass movements — Solifluction — Atterberglimits — internal friction angle — Permeability — Geomorphologically active site — Recent morphodynamic processes — Erosion control.

### RESUMEN

#### SENSIBILIDAD A LOS MOVIMIENTOS EN MASA (SOLIFLUXIÓN)

*Los movimientos en masa o soliflución son fenómenos frecuentes en las vertientes que se producen sea lentamente sea rápidamente y que afectan la totalidad o sólo algunas partes de las vertientes. Aunque el comportamiento del agua en las formaciones superficiales es sin duda el elemento principal con arreglo a las condiciones*

*climáticas y al sitio geomorfológico, otros numerosos factores y sus interrelaciones intervienen y hacen que el fenómeno puede asumir formas complejas y diversas ; la tipología propuesta procura dar cuenta de eso. Así, además de algunos valores característicos que pueden ser obtenidos por la mecánica de suelos, otros datos deben definirse con más precisión como el rol de la naturaleza de las arcillas o el de la materia orgánica o del contenido de algunos elementos (óxidos de hierro, carbonato de calcio, yeso). La lucha contra los efectos de los movimientos en masa resulta aún más difícil.*

**PALABRAS CLAVES :** Movimientos en masa — Solifluxión — Límites de Atterberg — Ángulo de fricción interna — Permeabilidad — Sitio geomorfológico — Dinámica actual — Lucha anti-erosiva.

Notre but est de reprendre quelques réflexions et résultats tirés de notre étude sur la solifluxion, déjà ancienne, très vite épuisée en librairie, et devenue inaccessible, alors que la demande est encore très forte actuellement. Mais nous voudrions aussi que cette reprise soit le point de départ d'une nouvelle recherche, et c'est en ce sens que, d'une part, nous soulèverons quelques interrogations, et que, d'autre part, nous préparons un programme de recherche en équipe, pour approfondir certains points.

#### LES CAUSES ET MÉCANISMES DE L'ÉROSION EN MASSE

Ainsi que le faisait remarquer A. JAHN, dès 1954, dans son article sur la « balance de dénudation », les forces qui s'exercent sur un versant peuvent se ramener à deux composantes :

- une composante à peu près perpendiculaire à la surface du versant qui transforme la roche mère par météorisation ou pédogenèse, et fournit du matériel meuble ;
- une composante parallèle à la surface du sol qui entraîne ces matériaux meubles sous l'action de la pesanteur.

Cette composante parallèle joue donc un rôle de « transport » recouvrant toute une série de phénomènes variés, dont les mouvements en masse, qui sont la manifestation d'un processus appelé généralement « solifluxion ».

La solifluxion procède ainsi d'une même cause, commune à tous les phénomènes affectant les versants : l'inclinaison de ces derniers par rapport à la verticale. C'est un mouvement dû à la gravité tout comme le ruissellement ou les éboulis. Elle fait partie d'un ensemble de processus tendant à enlever les formations meubles de la partie superficielle des versants, mais encore faut-il que ces formations meubles existent, par héritage d'un « stock » antérieur, ou reconstitution permise par la composante perpendiculaire. Elle peut se produire soit lentement, soit rapidement, et affecter une partie plus ou moins vaste du versant.

Les observations de terrain rendent compte de la complexité des phénomènes : ils peuvent être identiques dans les formations superficielles dérivées d'une moraine ou

d'une marne, alors qu'au contraire des phénomènes différents affectent des formations identiques. Mais on peut aussi constater que certains phénomènes ne se produisent jamais dans une formation déterminée. Ces différences sont en rapport direct avec les caractéristiques propres des formations affectées et, en particulier, leur comportement à l'eau.

#### Comportement rhéologique

Le problème principal est en effet celui de l'abondance de l'eau dans les formations superficielles, dont une des propriétés fondamentales est le pouvoir de laisser filtrer l'eau arrivant à la surface, ou au contraire de refuser tout ou partie de cette infiltration. Les ravinements, liés à un coefficient de ruissellement, se développent dans la mesure où l'eau des averses ne s'infiltré pas ou peu : la pente dans certaines conditions (de raideur, de longueur, de couverture végétale...), la faible entrave de la couverture végétale à la concentration des filets d'eau, les averses intenses et la faible perméabilité favorisent ce ruissellement. Cette vitesse d'infiltration, ou perméabilité, est une caractéristique connue en mécanique des sols et qui se détermine expérimentalement. Or c'est cette quantité d'eau infiltrée qui, en se mélangeant aux argiles, modifie leurs propriétés mécaniques, et, à mesure qu'elle s'accroît, les rend successivement plastiques puis liquides : les mouvements en masse se déclenchent sous l'effet de ces modifications.

Cette incorporation d'eau dans le sol ne produit cependant pas nécessairement une modification des propriétés : les couches superficielles doivent posséder pour cela certaines aptitudes à se transformer en boue liquide, ce qui leur permet de « s'écouler » sous l'effet de la sollicitation de la pesanteur. En effet, si ce passage à l'état boueux est fonction de la teneur en eau, il dépend aussi des argiles que contient ce sol. Cet état est défini en mécanique des sols par la limite de liquidité. Il peut arriver aussi, sans que la consistance boueuse soit atteinte, qu'une déformation plus lente affecte le versant. Cette déformation est due au réagencement des particules les unes par rapport aux autres, sous l'effet de la tension due à la pesanteur. La déformation d'une barre de glace posée sur deux chevalets en est un exemple classique. Là encore, le mécanisme ne se produit que si une quantité d'eau s'incorpore au sol : il s'agit

de la limite de plasticité, qui est inférieure à celle qui caractérise la limite de liquidité, et n'existe pas toujours ; un sable, par exemple, n'a pas de plasticité.

Ces limites représentent ainsi une propriété spécifique de la formation considérée et intègrent de nombreuses caractéristiques physico-chimiques du matériau.

### Comportement cassant

Mais l'évolution géomorphologique peut se faire aussi suivant une autre propriété des formations superficielles : leur résistance à la rupture. Dans le cas de glissements par paquets, par exemple, une rupture brusque se produit, qui entraîne vers le bas tout un pan de versant. On parlera d'un effet de cisaillement : cette rupture est due à une tension tangentielle, supérieure à la résistance qui retenait le matériel. Elle dépend du frottement interne et de la cohésion : une augmentation de la teneur en eau, réduisant cette cohésion, et/ou l'angle de frottement interne, peut provoquer le glissement, mais une accentuation de la pente, par entaille du pied de versant à la suite du sapement d'une rivière, par exemple, peut avoir le même effet, en portant l'angle de la pente à une valeur supérieure à l'angle de la pente en équilibre, lui-même étant en relation avec l'angle de frottement interne du matériau.

Il s'agit alors d'un réajustement brutal des conditions lithologiques par rapport aux conditions climatiques et, plus particulièrement, au site géomorphologique. Ce réajustement se répercute directement sur le façonnement de la pente.

## ESSAI DE TYPOLOGIE

Toute classification d'un processus d'évolution aussi complexe que celui des mouvements en masse est sans doute arbitraire, dans la mesure où nous sommes en présence d'un *continuum*. A partir de quel moment des formes localisées, de petite taille, mais très fréquentes peuvent-elles être assimilées à des mouvements généralisés ? Un même mécanisme, agissant avec des intensités différentes, engendre-t-il pas des formes différentes ? De nombreuses autres questions pourraient être posées... C'est la raison pour laquelle nous avons donné, en 1961 et à la suite de travaux portant sur un grand nombre de sites géomorphologiques, une définition des mouvements en masse basée sur les états d'une formation superficielle en relation avec les limites d'Atterberg :

« La solifluxion désigne tous les mouvements du sol en relation directe avec le franchissement des limites de liquidité ou de plasticité ou en relation indirecte avec le franchissement de ces limites par leur action sur la cohésion. »

Cette définition, très générale, a le mérite de permettre d'aborder le problème de la sensibilité des terrains : sensibilité croissante en fonction de l'épaisseur de la masse affectée, et de l'intensité du processus, mais aussi

sensibilité due à des conditions particulières de lithologie ou d'évolution.

### Les mouvements de surface

Comment s'opère le passage du ruissellement chargé à la solifluxion ? Lorsque la perméabilité est faible, le ruissellement est favorisé. Au contraire, la solifluxion exige une perméabilité minimum pour fonctionner. Il y a donc un seuil, variable selon certaines conditions, de part et d'autre duquel fonctionne, soit la solifluxion, soit le ruissellement, avec très souvent passage progressif de l'un à l'autre. Nous aboutissons ainsi à la loi suivante : ruissellement et solifluxion sont deux phénomènes antinomiques, variant en sens inverse en fonction de la perméabilité. Il reste cependant évident que c'est une loi théorique : dans la nature, les choses sont moins tranchées, car il y a toujours, ne serait-ce qu'en surface, un minimum de perméabilité et souvent les deux processus sont quasi concomitants.

C'est ainsi que si le *creep* (ou reptation) n'est pas à proprement parler un mouvement de masse, puisqu'il s'agit d'un réajustement grain à grain, certaines formes prises par ce phénomène entrent pourtant dans le domaine de la solifluxion.

Lorsqu'une légère infiltration de surface, sur terrain imperméable, permet le franchissement de la limite de liquidité, sur une mince couche superficielle, on passe à une reptation visqueuse qui est un écoulement boueux, en nappe (mouvement visqueux des particules). Une augmentation de l'humidité peut marquer la transition avec le ruissellement en nappe.

Lorsqu'il y a remaniement permanent des particules sous le seul effet du franchissement de la limite de plasticité, c'est un mouvement pâteux qui se produira ou reptation pâteuse. Ce processus se produit essentiellement dans des formations superficielles peu épaisses, mais portant un tapis végétal, ou dans des parcelles cultivées (fig. 1).

### Les mouvements dans la masse

Lorsque la perméabilité le permet, l'eau s'infiltré dans la masse. Tant que la teneur en eau et ses pressions interstitielles sont incapables d'introduire un mouvement plastique ou visqueux, aucun mouvement ne se produit, et le versant reste stable ; dès que certains seuils sont franchis, des déformations s'amorcent, avec rupture lorsque des concentrations locales se produisent.

— Lorsque l'eau s'infiltré suffisamment pour permettre le franchissement de la limite de plasticité, sans que la limite de liquidité soit atteinte, soit par suite d'un trop faible pourcentage des vides, soit à cause d'une arrivée insuffisante, un mouvement se produit, avec remaniement à l'état pâteux qui se manifeste par la présence en surface d'amples ondulations, avec des dénivellations de quelques décimètres. Des étirements et des

tassements peuvent se produire, mais il n'y a pas de déchirures. Les arbres sont souvent recourbés à la base, ce qui indique un mouvement lent, la végétation ayant le temps de s'adapter. Cette solifluxion pelliculaire, à amples ondulations, peut marquer les versants de façon généralisée (fig. 2).

— Lorsque le pourcentage des vides permet une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité, et qu'une quantité d'eau suffisante arrive sur le versant, des boursofflures apparaissent, qui peuvent également affecter l'ensemble du versant. Dans ces loupes de solifluxion la topographie est bosselée, très irrégulière, caractérisée par des bombements convexes de tailles diverses, avec un talus en pente forte et une partie presque plane en arrière, toujours très humide et à végétation hygrophile. Cette forme se retrouve toujours dans des matériaux très plastiques : après une crise relativement courte, l'évolution ultérieure se fait par simple franchissement de la limite de plasticité (fig. 3).

— Mais il arrive que ce franchissement de la limite de liquidité se produise de façon plus ponctuelle, avec formation d'une poche qui crève. Ces griffures peuvent prendre deux formes principales :

- les coups de cuiller qui se présentent comme une déchirure avec une partie supérieure en arc de cercle, et d'où s'échappe par le bas un matériel épandu en boue liquide. On peut parler de niche d'arrachement, les parois de la déchirure étant abruptes et se resserrant vers le bas, le fond étant à peu près plat (fig. 4) ;
- les coulées boueuses qui sont des griffures identiques aux coups de cuiller, mais avec une langue de matériel qui s'en échappe. Ce dernier se répand et s'égoutte à la sortie de la poche qui a crevé. L'importance de la langue sera fonction de la quantité d'eau qui était accumulée, et du matériel ainsi pris en charge (fig. 5 et 6).

#### Les mouvements dus à des conditions particulières

La sensibilité aux mouvements en masse peut résulter de conditions lithologiques (au sens large) particulières, ou d'une évolution consécutive à une modification du milieu par cause naturelle ou intervention anthropique.

#### LES FOIRAGES

Les foirages correspondent à une forme de solifluxion par ondulations, bien particulière : il y a franchissement de la limite de plasticité dans une formation surmontée d'une roche dure, avec pression de cette roche. Ils caractérisent en particulier les reliefs de *cuestas* où l'on rencontre le *binôme* roche dure reposant sur une roche tendre. Deux formes principales peuvent apparaître : le foirage par pression simple, avec déformation de la roche tendre du dessous, dès qu'elle se trouve à l'état plastique, et le foirage par pression-rotation lorsque les

paquets de la corniche qui s'éboulent subissent un mouvement de rotation (fig. 7).

#### LES GLISSEMENTS EN PLANCHE (fig. 8 et 9)

Il s'agit là encore de la superposition de deux formations différentes, avec une moindre perméabilité pour celle qui se trouve à la base. Il en résulte un plan de contact lubrifié par l'action de l'eau : le franchissement des limites de liquidité ou de plasticité dans ce plan va entraîner un simple glissement de la formation superficielle. Il y a une certaine ressemblance avec les coups de cuiller mais pourtant des différences caractéristiques : le matériel n'est pas remanié au moment du glissement, les bords de la griffure ne sont pas en arc de cercle mais prennent des formes irrégulières, le plancher de la griffure n'est pas horizontal mais garde une pente sensiblement identique à celle du versant (fig. 10).

Ces glissements en planche peuvent cependant être d'une plus grande complexité lorsqu'il se produit une rotation — dans le cas où le matériau de surface est peu plastique, il est brassé à la suite du glissement — un profond bouleversement de la topographie préexistante peut intervenir, il y a foisonnement, c'est-à-dire augmentation de volume de la masse. Ce sont généralement des glissements dont la base se trouve à une assez grande profondeur.

#### LES DÉCOLLEMENTS

Les décollements se produisent toujours sur une partie de versant en pente plus forte que l'ensemble. Ils correspondent à une zone d'équilibre instable, par suite d'un angle de frottement interne inférieur à la pente du talus. Il y a réduction de la cohésion qui maintenait l'équilibre et qui fait s'écrouler la partie instable. Ils sont consécutifs, par exemple, au sapement de la base du versant par une rivière ou par une entaille humaine : ils nécessitent ainsi une intervention étrangère à l'évolution propre du versant. On peut là encore distinguer plusieurs types :

- les décollements par simple arrachement, griffure qui se produit en une seule fois, avec éboulement du matériel (fig. 11) ;
- les décollements avec affaissement, qui se produisent dans les mêmes conditions, mais avec une zone de décollement masquée : le véritable décollement qui aurait dû se produire est perturbé par la forte plasticité du matériel qui ne fait que s'affaisser sans se rompre (fig. 2) ;
- les décollements par paquets, qui correspondent à un réajustement progressif avec décollements de petite taille, successifs, remontant le long du versant. Il y a ainsi formation de gradins ou marches d'escalier (fig. 13).

Cette typologie simplifie les choses : la notion de sensibilité est abordée globalement à partir d'observations

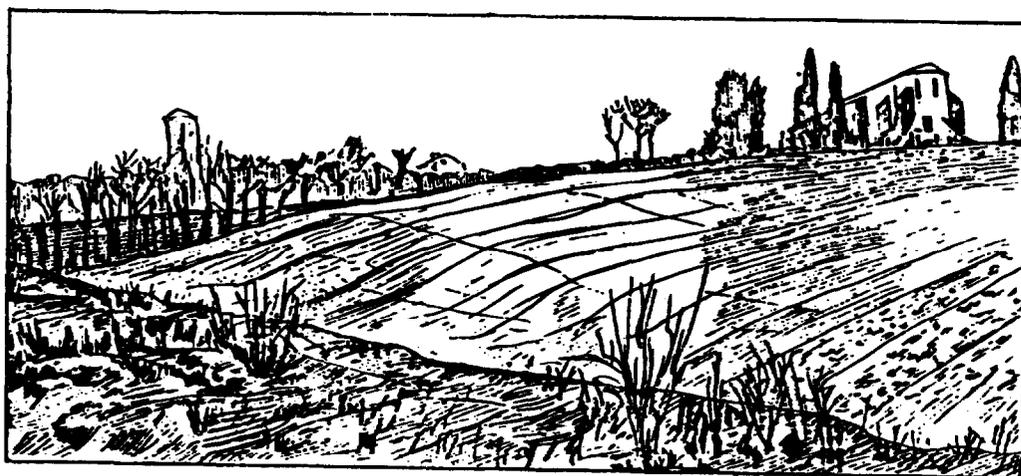


FIG. 1. — Près de Auch (Gascogne). Entrée est de Laveret (N634). Creep et reptation.  
*Creeping.*

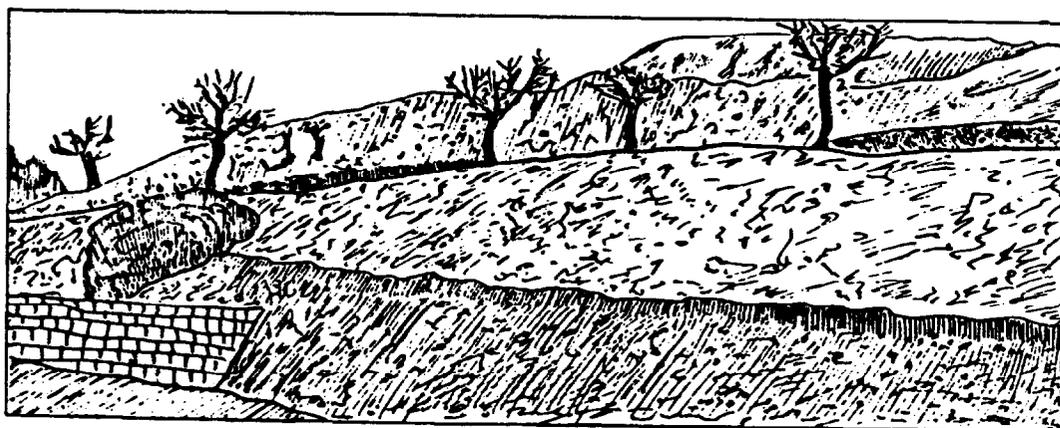


FIG. 2. — Près de Lamure (Alpes). Solifluxion pelliculaire à amples ondulations  
(allure courbée de presque tous les arbres).  
*Thin solifuction with broad rolling.*

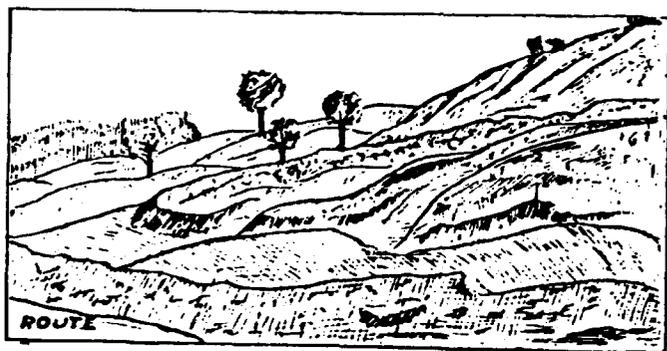


FIG. 3. — Région de Bâle (Suisse)  
1,5 km nord de Balsthal. Versant boursoufflé.  
*Swollen slopes country.*

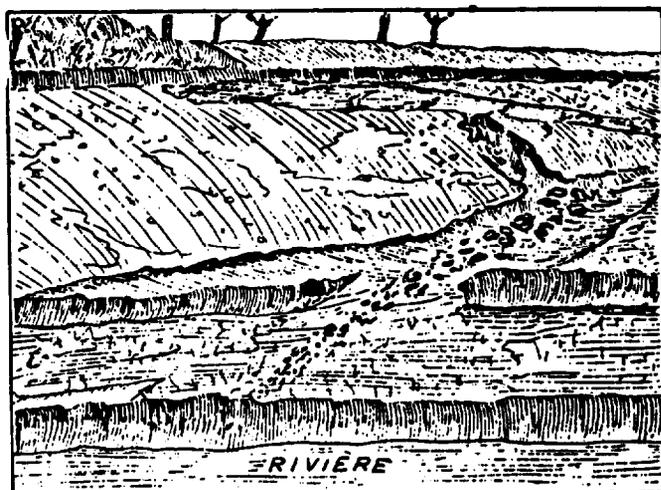


FIG. 4. — Sortie de Tulle (Massif Central) sur D23. Coup de cuiller.  
*Spooned off surface.*

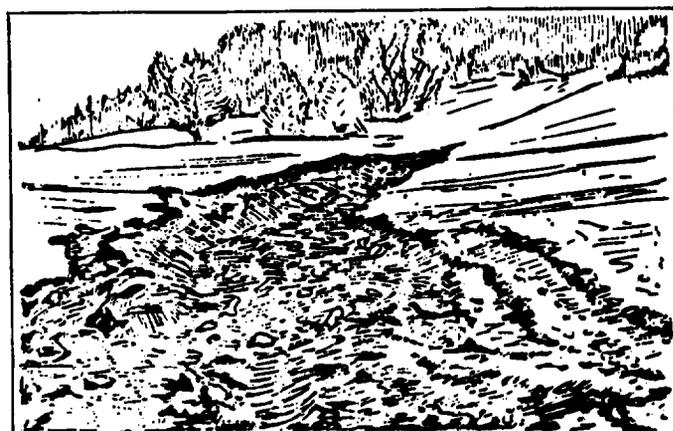


FIG. 5. — Amont de Bellevaux (Haute-Savoie) sur route de Thonon (D26). Coulée boueuse.  
*Mudflow.*

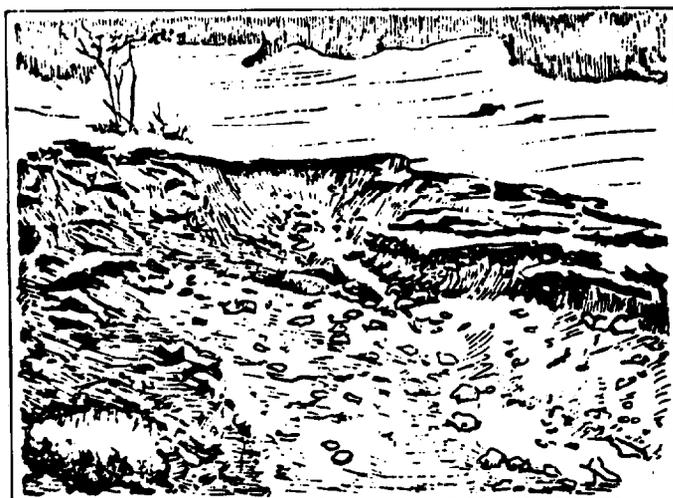


FIG. 6. — Amont de Bellevaux (Haute-Savoie) sur route de Thonon (D26). Détail de la zone d'arrachement de son site (dans un creux).  
*Wrenching zone detail.*

de terrain et d'analyses de laboratoire qui ne fournissent en définitive qu'une résultante. Les données de la mécanique des sols intègrent certes un certain nombre de facteurs, mais sont-elles suffisantes ? Il y a encore de nombreux points qui restent à préciser. P. USSELMANN en avait fait une première approche, mais n'a guère été au-delà : sa réflexion va cependant dans le même sens que la nôtre pour en préciser quelques-uns.

### QUELQUES PROBLÈMES EN SUSPENS

L'élément déterminant dans la sensibilité des formations superficielles aux mouvements en masse est incontestablement la présence de l'eau (et la pression d'eau interstitielle), qu'elle soit d'origine atmosphérique ou localement concentrée par suite de la disposition des terrains et de leurs propriétés intrinsèques. Si donc les mouvements en masse se produisent dans des régions à forte ou moyenne pluviosité, il est néanmoins nécessaire de nuancer cette affirmation, car on connaît des cas de solifluxion dans des régions à fort déficit de pluviosité.

La pente du versant a aussi une certaine importance. Mais là encore des nuances doivent être apportées, les conditions climatiques sont primordiales, la solifluxion périglaciaire exigeant par exemple des pentes plus faibles que la solifluxion tempérée. On peut même envisager le cas extrême, à partir de la faculté qu'ont certains matériaux de changer rapidement d'état physique à la suite de secousses : c'est la thixotropie qui produit des mouvements en masse à l'intérieur de formations quasi horizontales dès qu'elles sont secouées (plates-formes de routes par exemple).

La texture des formations n'est pas plus déterminante : si l'on a longtemps pensé que les mouvements en masse se produisaient dans des formations à granulométrie très fine, les observations de terrain montrent que des mouvements peuvent apparaître dans des formations où les argiles sont inférieures à 10 %.

Mais à ces questions générales viennent s'ajouter des facteurs plus particuliers, qui n'en sont pas moins déterminants, sans oublier les interactions parfois imprévisibles : elles peuvent aller dans le même sens, et amplifier les phénomènes, ou au contraire se contrecarrer. Sans en faire une liste exhaustive, on peut en relever quelques-uns :

— La nature des argiles : certaines argiles emmagasinent une grande quantité d'eau avant de devenir liquides (illites, vermiculites, montmorillonites), ayant ainsi une possibilité de gonflement, très favorable aux mouvements en masse par franchissement de la limite de plasticité. D'autres au contraire, comme la kaolinite, pauvre en silice, varient très peu de volume en présence d'eau : les déformations plastiques seront rares, mais

le rapide franchissement de la limite de liquidité sera à l'origine de glissements avec déchirures.

— La teneur en matière organique humifiée : on a constaté que lorsque cette teneur s'élève, les limites d'Atterberg s'élèvent également.

— La teneur en oxydes de fer : cette teneur joue dans le même sens d'une augmentation des valeurs des limites d'Atterberg.

— La teneur en carbonate de calcium, en magnésium, en gypse... : ces teneurs auraient une influence contraire aux précédentes, c'est-à-dire qu'une faible proportion de ces éléments tendrait à diminuer les valeurs des limites d'Atterberg (défloculation des argiles ?).

— La perméabilité : la perméabilité semble généralement diminuée par la présence d'un fort pourcentage de particules fines, inférieures à 50 microns et très diminuée par une densité sèche élevée : le rôle du tassement, comme dans la semelle de labour, ne semble ainsi pas avoir été pris suffisamment en compte. La capacité d'infiltration de la surface du sol et les états structuraux de surface paraissent d'une extrême importance. Il en va de même de la nature des argiles : dans une formation sableuse, a priori perméable, la présence d'argiles gonflantes peut diminuer la pénétration verticale de l'eau, tout comme par ailleurs le tassement de ces sables, en particulier lorsqu'ils sont hétérométriques : les fines viennent colmater les vides entre les grains plus grossiers.

La distinction entre sols argileux « imperméables » et sols sableux « perméables » doit ainsi être largement nuancée.

— Enfin, les données biotiques ne doivent pas être négligées : le type de végétation, le type d'enracinement, la présence d'animaux fouisseurs, le rôle de la mésofaune sur l'infiltration, sont autant d'éléments qui peuvent modifier la sensibilité du milieu.

### CONCLUSION

La sensibilité aux mouvements de masse dépend ainsi de nombreux facteurs dont il faut essayer de déterminer l'importance respective, et les interrelations à l'intérieur des trois données de base que sont les conditions climatiques, la nature des formations superficielles et le site géomorphologique. La connaissance de cette sensibilité est indispensable dans le délicat problème de la conservation des terres, or il faut reconnaître que l'on reste relativement désarmé devant les mouvements en masse, par suite d'une insuffisance de la prise en compte de tous les facteurs.

Si certains, comme la reptation ou les mouvements à amples ondulations ne semblent avoir, à l'échelle humaine, aucun caractère de gravité, ils représentent cependant une érosion insidieuse qui décapait la partie

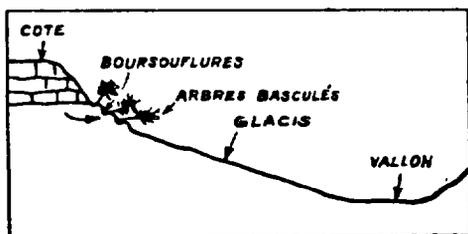


FIG. 7. — Sud de Metz (Moselle). 2 km ouest de Gorze. Boursouflures par pression de la couche formant corniche. Swelling from pressure of ledge shaped layer.



FIG. 8. — Amont du barrage de Serre-Ponçon-Savines (Alpes) Glissement en planche. Board shaped land slide.

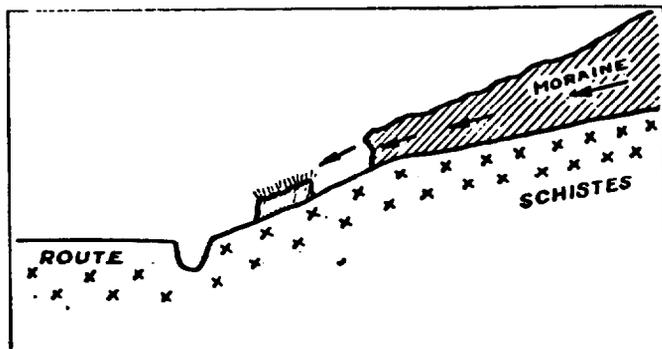


FIG. 9. — Amont du barrage de Serre-Ponçon-Savines (Alpes). Schéma montrant le glissement dans le plan de contact schistes/moraine. Diagram of land slide according to schist/moraine contact plane.

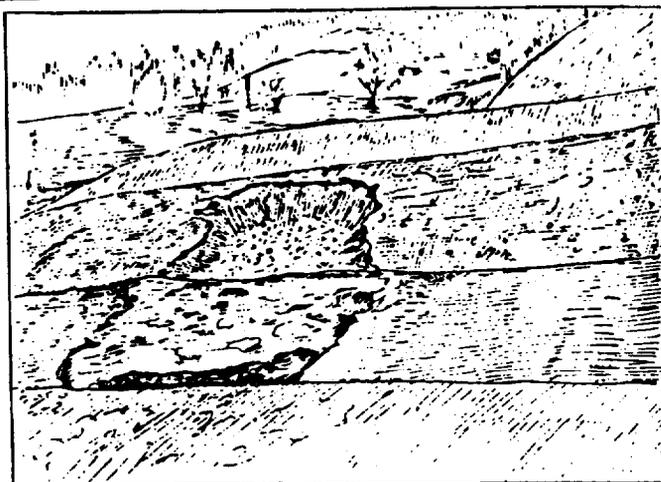


FIG. 10. — Amont d'Abries (Aveyron). Glissement en planche. Board shaped land slide.



FIG. 11. — Sortie de Tulle (Massif Central) D9 à Souillac. Décollement par simple arrachement. *Detachment from simple wrenching.*

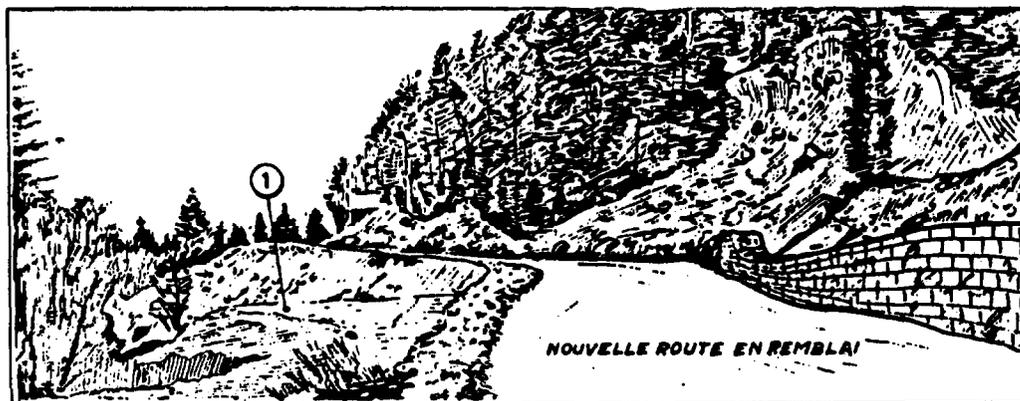


FIG. 12. — Col de la Faucille (Jura). Au-dessus de Mijoux sur N436. Décollement par paquets successifs. *Detachment in successive parcels.*

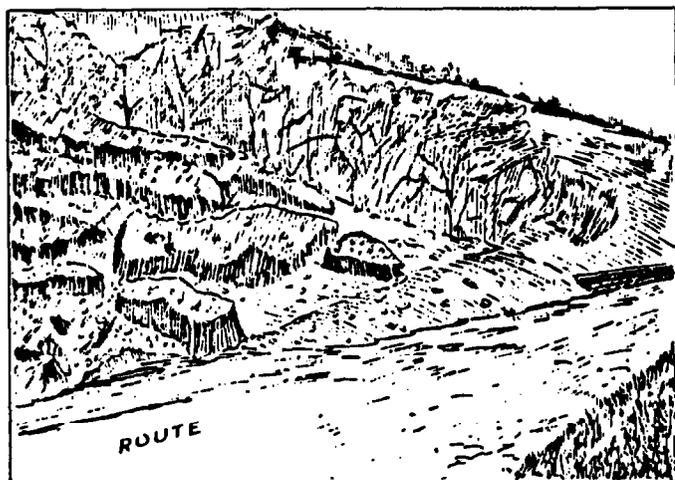


FIG. 13. — Amont de l'Abbaye de Sélignac (Jura) N436. Décollement par paquets successifs. *Detachment in successive parcels.*

supérieure des sols, avec toutes les conséquences agromonomiques que cela comporte. D'autres, comme les coulées boueuses ou les décollements par paquets peuvent présenter des risques importants pour les constructions ou les routes, sans parler de la détérioration des terroirs : faute d'une connaissance suffisante des phénomènes et de leur genèse, on a trop souvent confondu les travaux de défense sans s'occuper des processus mis en jeu par la nature. Les coulées boueuses ont par exemple ainsi été traitées comme si elles appartenaient aux formes d'érosion torrentielle, des talus de routes ont été retenus par des murs empêchant l'écoulement de l'eau (fig. 14).



FIG. 14. — Aval de Thuiles (Ubaye) N100. Effondrement d'un mur de soutènement mal conçu. Forte thixotropie au-dessus de la partie du mur qui a résisté.

*Breaking down of supporting wall. High thixotropy above the part of the undamaged wall.*

La solution « globale » est d'éliminer ou de diminuer au minimum les apports d'eau, par drainage superficiel, captage des eaux de suintement en amont des mouvements... mais ces indications générales, devront être appliquées avec des nuances selon les endroits, car tout aménagement doit être adapté aux conditions particulières de chaque site : c'est ce que nous avons cherché à montrer dans cet article, certes basé sur des travaux anciens, mais dont les principes restent valables, même si certains apports récents modifient ou nuancent nos connaissances techniques, et justifient la poursuite de recherches théoriques et appliquées.

### Les apports récents

Un des problèmes est celui de la signification réelle

des limites d'Atterberg. Elles sont arbitraires et il s'agit de savoir si, sur le terrain, une couche commence à subir un mouvement visqueux (état boueux), à la teneur en eau qui marque la limite de liquidité et qui est déterminée dans les conditions standardisées de la coupelle de Cassagrande, l'échantillon étant par ailleurs remanié. Le rôle de la pression d'eau interstitielle est à préciser.

De même, est-il sûr qu'une argile montre un comportement plastique à partir de la teneur en eau correspondant à la limite de plasticité, déterminée selon la méthode standardisée d'un fil de 3 mm qui se casse quand il est roulé ? En mécanique des sols, un comportement plastique idéal se présente quand le matériel se déforme infiniment sous une contrainte de cisaillement  $k$  (fig. 15, d'après communication écrite de MOEYERSONS).

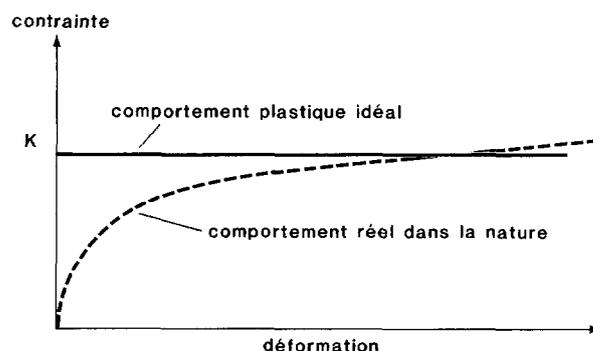


FIG. 15. — Résistance du sol.  
(D'après communication écrite de MOEYERSONS.)  
*Land behavior.*

La résultante de ce qui précède est que si l'on trouve sur le terrain une assise avec une teneur en eau typique des limites de plasticité ou de liquidité, est-il possible d'affirmer qu'il y a un mouvement plastique ou visqueux ?

Enfin, on sait maintenant que la résistance d'un sol au cisaillement n'est pas une valeur fixe : il existe des processus qui ont pour effet une diminution de cette résistance dans le temps. Un de ces processus est le « creep » comme le montre l'article de J. MOEYERSONS.

### De la protection à la prévention

J.-C. FLAGEOLLET a parfaitement défini, dans un ouvrage récent (Les mouvements de terrain et leur prévention, 1988), les deux attitudes qui sont adoptées dans la protection contre les mouvements de terrain :

« La plupart des actions entreprises et des travaux effectués peuvent l'être à titre préventif ou à titre curatif. Les unes participent d'une défense active, en essayant

d'agir sur les causes du mouvement en cours ou du mouvement potentiel. Les deux principales actions de défense portent sur l'eau et sur le couvert végétal... Les autres relèvent d'une défense que l'on peut qualifier de passive, elle retient les matériaux, en mouvement ou susceptibles de l'être, et concerne les terrassements et la construction d'ouvrages de soutènement. L'élimination de surcharges est aussi une forme de défense. »

Mais il faut bien reconnaître que l'application de ces principes se heurte parfois à des difficultés dans la réalisation pratique des ouvrages, et souvent dans le suivi de ces travaux : un système de drainage, superficiel ou profond, perdra toute efficacité s'il n'est pas entretenu, les « fuites » pouvant par exemple être catastrophiques. Plus généralement, il peut y avoir une certaine opposition dans la lutte contre l'érosion en nappe et ravines d'une part, l'érosion en masse de l'autre : les mésaventures de la banquette « systématique » en Afrique du Nord sont là pour nous le rappeler.

En tout état de cause, cette lutte contre les mouvements en masse se situe à plusieurs échelles ; elle peut être locale, pour préserver un site (passage de route,

protection d'une construction...), ou à l'échelle de l'aménagement d'un bassin-versant, et entrer alors dans un plan d'ensemble où, par exemple, le blocage des entailles linéaires, en agissant sur le système hydrologique, pourra stabiliser les pentes.

C'est en définitive dans le domaine de la prévention que les progrès ont été les plus considérables au cours de ces dernières années. Spatiale par essence, cette prévision est essentiellement basée sur la cartographie à différentes échelles. Nous renvoyons là encore à J.-C. FLAGEOLLET (*op. cit.*, 1988) qui en a fait un recensement exhaustif. Les cartes de zones « à risques » de mouvements sont les plus connues en France sous l'appellation ZERMOS (zones exposées aux risques de mouvements du sol et du sous-sol). L'étude et la connaissance des facteurs d'instabilité permettent de localiser les zones à risques et de hiérarchiser ce risque. Elles servent généralement de base à des cartes réglementaires « les plans d'exposition aux risques » (PER).

Manuscrit accepté par le Comité de Rédaction le 23-10-1989.

## BIBLIOGRAPHIE

### Références directement utilisées dans cet article

AVENARD (J.-M.), 1962. — La solifluxion ou quelques méthodes de mécanique des sols appliquées aux problèmes géomorphologiques des versants. Centre de Documentation Universitaire, Paris 164 p. (épuisé).

AVENARD (J.-M.), TRICART (J.), 1961. — Techniques de travail et idées de recherches : Application de la mécanique des sols à l'étude des versants. *Revue de Géomorphologie Dynamique*, t. XI : 146-156.

JAHN (A.), 1954. — Balance de dénudation des versants. *Czaspriamo Geogr.*, XXV : 38-64.

USSELMANN (P.), 1972. — Les mouvements de masse dans le bassin-versant. ULP Strasbourg, 9 p., *multigr.*

### Orientation bibliographique (références récentes)

ANDERSON (M.G.), RICHARDS (K.S.), 1987. — Slope Stability. J. Wiley and sons Ltd., Chichester, 656 p.

ASSOCIATION FRANÇAISE DE GÉOGRAPHIE PHYSIQUE, 1984. — Mouvements de terrain, Colloque de Caen - mars 1984, Documents du BRGM n° 83, 670 p.

BRUNSDEN (D.), 1979. — Mass movements, in Process in Geomorphology. C. Embleton and J. Thornes éd. P. Arnold, London, 436 p.

BRUNSDEN (D.), PRIOR (D.B.), 1984. — Slope instability. J. Wiley and sons Ltd, Chichester, 646 p.

COLAS (G.), PILOT (G.), 1976. — Description et classification des glissements de terrain. *Bull. liaison Ponts et Chaussées*, spécial mars, 21-30.

CROZIER (M.J.), 1986. — Landslides : causes, consequences and environment. Croom Helm. London Sydney, 252 p.

FILLIAT (G.), 1981. — La pratique des sols et fondations. Mouvements de terrain - éd. du Moniteur, Paris, 555-626.

FLAGEOLLET (J.C.), 1988. — Les mouvements de terrain et leur prévention. Masson, Coll. Géographie, 224 p.

FREY (P.), 1977. — Prévision spatiale et temporelle des glissements et coulées boueuses. Incidence de la pluviométrie sur leur déclenchement. Centre de Géologie de l'Ingénieur, Ecole supérieure des mines de Paris, 160 p.

HUMBERT (M.), VOGT (J.), DELAUNAY (J.), 1983. — Le fichier d'information sur les mouvements de terrain en France et ses applications. Hydrogéologie-Géologie de l'Ingénieur, BRGM, 2, 83 p.

PINCENT (B.) *et al.*, 1983. — Mesure en place des mouvements de versants naturels. *Bull. Assoc. Intern. Géol. Ingénieur*, 26-27 : 107-111.

YAGUE (A.G.), 1978. — Modern methods used in study of mass movements. *Bull. Assoc. Intern. Geol. Ingénieur*, 17 : 65-71.