

J. V. Mudrov * et N. V. Tumel *

Moscou

LE RÔLE DE LA TIXOTROPHIE DANS L'ÉVOLUTION DU MICRORELIEF DES PAYS DU NORD ET DES HAUTES MONTAGNES

Le phénomène particulier de la tixotrophie du sol aux pays du Nord a été plusieurs fois déjà traité dans la littérature (Grigoreva 1961; Poltev 1963; Liverovskaya-Kocheleva 1964; Zhigarev 1963). Ces derniers temps s'établit l'opinion que le phénomène est largement répandu.

Le phénomène de la tixotrophie consiste en ce qu'une formation meuble superficielle ou un sol, sa saturation en eau étant inchangée, perd sa stabilité, cesse d'être solide et devient une masse boueuse liquide sous l'influence d'une action physique quelconque, mécanique ou autre (ondes ultrasoniques ou courant électrique par exemple). Quand cette influence cesse d'agir, la roche redevient cohérente.

Ce sont les particules colloïdales, au dessous de 0,001 mm de diamètre, qui sont porteurs des propriétés tixotropiques. Possédant une énergie superficielle énorme elles s'entourent d'épais films d'eau faiblement liée. La structure tixotrophe disparaît au moment où ces films d'eau deviennent si gros que le mouvement brownien des particules colloïdales est impossible. La liaison structurale entre les particules des formations tixotropes se réalise à l'intermédiaire de ces films d'eau dont s'entourent les particules colloïdales.

Afin que les propriétés tixotropes se réalisent, il suffit donc que la roche possède une quantité déterminée de particules argileuses et soit suffisamment saturée d'eau. Les structures tixotropes ne sont stables qu'à l'état de repos. Des actions mécaniques ou autres processus provoquent très facilement leur dissolution. La cohésion causée par les films d'eau se perd, une partie de l'eau faiblement liée se relâche et passe à l'état libre. C'est pourquoi, sous influence d'une action mécanique ou autre, agissant sur une formation tixotrophe, le sol se relâche et devient une

* Chaire de Géographie des Pays Polaires et de Glaciologie.

masse boueuse, liquide, dont n'est responsable que l'humidité interne, l'humidité participante dans la création de la structure tixotrophe.

La tixotrophie des sols observée aux pays du Nord et dans les hautes montagnes et qui se manifeste par la suite des processus cryogéniques les distingue d'une façon très nette des formations analogues connues d'autres zones géographiques. La répétition de gel—dégel, entraînant une redistribution répétée incessante de l'eau du sol et l'accumulation des fractions fines, colloïdales, empêchent le développement des liaisons structurales dans la roche plus fortes que celles tixotrophiques.

C'est surtout au printemps et en automne que les caractères tixotropes s'observent, au temps donc, où la saturation du sol en eau est la plus favorable. En été, l'assèchement du sol et la diminution de la teneur en particules colloïdales par la suite de la formation des microagrégats, diminuent les chances de la réalisation du phénomène et parfois même causent son entière disparition.

Les observations effectuées dans plusieurs pays du Nord, tant dans des régions de plaine que celles de hautes montagnes (Europe Septentrionale, Sibérie Occidentale, le pays de l'Iénisséi du Nord, la presqu'île des Tchouktches, les montagnes de Khibiny, les montagnes sud de Touva, le Caucase du Nord) montrent que la tixotrophie a lieu sur des formations superficielles meubles produisant le microrelief de pergélisol — des sols structurés, cellulaires, aux surfaces horizontales, sols striés et de diverses formes de solifluxion aux versants.

D'après A. I. Popov il existe un rapport entre les propriétés tixotropes du sol et la mise en place de diverses formes de microrelief. Il nous semble aussi que le développement du microrelief de pergélisol a lieu sur les sols tixotropes. C'est l'instabilité de leur structure qui détermine leur résistance et susceptibilité de déformation (Grigoreva 1961).

On sait bien que c'est au printemps et en automne qu'a lieu le développement et les transformations des formes dues au gel les plus intenses, aux périodes donc, auxquelles le phénomène de la tixotrophie se manifeste aussi fortement. C'est-à-dire que c'est bien à ce temps là que tant la perte de la stabilité des sols tixotropes sous l'influence d'une action mécanique que la reprise de la stabilité après la fin de cette action se manifestent de la façon la plus rapide.

La cause de la destruction des structures tixotropes peut être le régime thermique particulier régnant à la surface du sol. Des changements de la température relativement brusques, ce qui est surtout caractéristique pour le printemps et l'automne, provoquent de fortes migrations de l'eau dans les structures tixotropes, ce qui, en conséquence, mène à leur destruction. L. A. Zhigarev (1965) est d'avis que la destruction

de la structure, au cas du changement de la température du sol autour de 0°, est liée à la réorientation des particules argileuses, provoquée par la pression des cristaux de glace accroissants. Il en résulte une libération partielle de l'eau pelliculaire faiblement liée, participant dans la formation de la structure tixotrophe, et le passage à l'état liquide. Ce processus doit forcément faciliter des transformations de morphologie du terrain. Comme l'effet il a, nous semble-t-il, le développement du microrelief de pergélisol tant structuré qu'amorphe.

Les formes de microrelief structuré (flaques de terre, polygones et cercles de pierres, buttes minérales) sont dues au processus de développement des fentes de dessication, dont le mécanisme est analogue à la formation des fentes de gel. La seule différence consiste en ce qu'au lieu du gradient thermique c'est le gradient d'humidité résultant lors de l'assèchement de gel qui est la cause de l'éclatement de la surface du sol en blocs.

La transformation intense ultérieure du microrelief structuré a lieu, elle aussi, grâce au caractère tixotrophe du sol meuble. Dans les réseaux de fentes développés au printemps et en automne sur des sols relativement secs, la congélation cause de fortes tensions facilitant le développement considérable de diverses formes de sols structurés.

La transformation des formes de sols structurés en une masse boueuse semi-liquide n'est pas causée par un apport extérieur de l'humidité mais par le caractère tixotrophe du sol-même, grâce auquel la quantité suffisante d'humidité peut être accumulée dans le sol sous forme de l'eau pelliculaire faiblement liée. Destruction de la structure tixotrophe sous l'influence des changements brusques de la température, par exemple, libérant une partie de l'eau, mène à la liquéfaction du sol en forme d'une masse boueuse. Si la cause du phénomène avait été un apport de l'humidité provenant des précipitations atmosphériques il aurait pu avoir lieu au temps de n'importe laquelle pluie d'été. Dans la toundra à des sols structurés cela pourtant ne s'observe pas après la pluie. Au lieu de cela, sous des conditions météorologiques déterminées, les mêmes sols passent plus ou moins vite à l'état de la masse boueuse sous l'effet d'une action mécanique. Les faits de la coulée de ces sols au cours des forages ou après le passage d'un tracteur sont généralement connus.

La masse boueuse, soumise à une pression à l'intérieur d'un système fermé, s'épanche à la surface ou déchire la couverture végétale et jaillit en sorte de petit volcan. Quand le gazon est trop résistant le déchirement peut ne pas avoir lieu. La terre gazonnée enveloppe alors la masse gonflée du sol. C'est ainsi que se forment des systèmes entiers de buttes de gonflement minérales.

Le gonflement de la couche superficielle de la zone active sous les buttes de gonflement favorise l'épanchement de la masse boueuse en tous les sens et il arrive à l'effacement des zones de fentes. Sous la surface plane des flaques de terre les couches de la zone active du pergélisol sont tantôt horizontales tantôt légèrement dressées aux centres de flaques. C'est pourquoi il n'y arrive pas à l'effacement des fentes et les formes des sols structurés s'y observent de la façon plus nette.

Le contenu plus ou moins important de débris dans le sol complique le processus que nous venons de décrire. Dans ce cas-là on voit naître des polygones et cercles de pierres plus ou moins triés. Le sol tixotrophe non seulement ne s'oppose pas au triage de gros débris mais lui est favorable. Dans la terre plastique ou même boueuse le transport des pierres vers le haut par le gel se fait plus vite, tandis que sur la surface gonflée des flaques de terre l'évacuation des débris vers la périphérie est largement facilitée. Grâce au caractère plastique et glutineux des sols tixotropes les pierres, même gros, ne s'enfoncent pas mais se maintiennent à la surface ou roulent en bas.

Le développement large du microrelief à flaques de terre s'observe, par exemple, dans la Bolchezemelskaya Toundra, où le rapport entre la tixotrophie des sols et le développement général des formes de sols structurés s'exprime très nettement. Les deux phénomènes se rencontrent, en principe, sur des surfaces des blocs du mésorelief polygonal. Les blocs polygonaux se caractérisent d'une faible profondeur (0,5—1,0 m) du sommet du pergélisol et d'un processus de congélation rapide, ce qui entrave la stabilisation structurale des couches superficielles de la couverture limoneuse. Aux côtés de polygones où, en général, le sol gelé saisonnier n'atteint pas le pergélisol et où celui-là, en principe, ne dépasse pas la profondeur de 0,5 m à cause d'une épaisse couche de neige, le sol se caractérise d'une cohérence plus marquée et le phénomène de la tixotrophie le plus souvent ne se manifeste pas.

La composition granulométrique de la couverture limoneuse superficielle, tant aux blocs polygonaux qu'aux côtés de polygones, ainsi que son humidité, dont, en premier lieu, dépend la tixotrophie, sont très homogènes. Le contenu en poudres est à peu près partout le même (50—65%) mais la proportion d'argile aux blocs polygonaux s'élève à 7—17% tandis qu'aux côtés à 18—23% déjà. Ici il faut tenir compte du fait que ces chiffres embrassent la fraction argileuse en entier, c'est-à-dire toutes les particules au-dessous de 0,005 mm. Mais ce sont les particules colloïdales, plus petites encore (au-dessous de 0,001 mm), et dont le contenu dans le sol est considérablement plus faible encore, qui participent activement dans le développement de la structure tixotrophe. Dans des conditions

de l'humidité déterminées ce sont les blocs polygonaux où la couche limoneuse superficielle contient la quantité optimale de fraction colloïdale, grâce à laquelle le phénomène de la tixotrophie se manifeste. Au printemps et en automne, aux périodes de la tixotrophie maximale, cette humidité de la couche superficielle (jusqu'à la profondeur de 0,5 m) est de 35 à 40%. En été, dans les sols plus secs, à une tixotrophie faible l'humidité diminue jusqu'à 18—25%. Aux côtés de polygones l'humidité est plus homogène, tant par rapport au temps qu'au profil du sol et s'élève à 20—25%. Aux côtés de polygones tant la granulométrie de la couche limoneuse superficielle que l'humidité ne sont guère favorables à la tixotrophie et c'est pourquoi on n'y observe pas de microrelief à flaques de terre.

Les rapports analogues entre le microrelief structuré et la tixotrophie a lieu dans des régions de montagnes du Nord et dans les hautes montagnes ailleurs. Dans les montagnes de Khibiny, de Touva et au Caucase du Nord les flaques de terre, cercles de pierres et polygones occupent de petites surfaces isolées. Flaques de terre, par exemple, sont liées souvent aux rivages de lacs, où il n'est pas rare de les rencontrer même sous l'eau dans des lieux peu profonds. Elles sont formées de matériel limoneux fortement tixotrope et fort humide (35—50%). Dans leur voisinage, où il n'y a pas de flaques de terre on n'observe de sols tixotropes non plus.

De telles formes que les cercles de pierres et polygones sont aussi plutôt rares et isolées dans les montagnes. On ne les voit que sur des croupes plates où la fraction fine du sol devient tixotrophe dans des conditions d'humidité déterminées. Si les formations lacustres, grâce à des réserves d'humidité considérables, se caractérisent d'une tixotrophie très nette au cours de la période d'été entière, les formations glaciaires et éluvio-déluviales séchent vite aux plateaux. Par conséquent, la tixotrophie en principe, ne s'y observe pas en été.

Déformation du microrelief structuré aux versants est un phénomène qui reste en rapport avec la possibilité de déplacement du sol tixotrope perdant sa stabilité. La vitesse du mouvement vers le bas dépend, à un haut degré, de l'inclinaison du versant. Les flaques de terre et les buttes minérales, d'abord ovales, s'étirent d'autant plus que la pente est plus forte. Les formes du type de polygones de pierres se transforment en des sols striés.

Les versants couverts de matériel tixotrope diffèrent nettement, par sa morphologie, de ceux où le sol n'est pas tixotrope. Le profil de ceux-là, dû au large développement des flaques de terre et des polygones de pierres étirés est semé de gradins. La surface de ces formes reste horizontale ou,

au moins, beaucoup moins inclinée que la pente moyenne du versant. Au front de chaque flaqué de terre se forme un bourrelet, dû à la pression de la masse glissante.

Le développement des formes amorphes du microrelief, celles de solifluxion par exemple, dépend aussi du caractère tixotrope du sol.

Ce sont des loupes de solifluxion et de petits gradins à un net front convexe qui représentent les formes de coulée les plus caractéristiques. Ils sont surtout bien développés aux versants de 5—8°. Il est un fait fréquent que plusieurs loupes forment une microterrasse. Les formes de coulée sont toujours formées de matériel plus fin que leur substrat immédiat. Dans la vallée de la basse Petchora, par exemple, on observe des loupes limoneuses, reposant sur des sables fins, à une granulométrie bien homogène. A une certaine profondeur sous elles on peut observer l'horizon d'humus fossilisé, reparaissant à la surface juste devant le front de la loupe. Cela témoigne que le mécanisme de la formation des loupes est un mouvement lent le long du versant.

Les terrasses de solifluxion, donnant au versant un profil en gradins, sont dues à la collaboration du processus de solifluxion avec les processus de nivation. Ces deux processus, d'ordinaire, sont liés étroitement l'un à l'autre. Les formes nivales ne se développent jamais sans une participation de la solifluxion. Car c'est la solifluxion qui, de pair avec l'écoulement déluvial et celui des eaux de fonte, évacue le matériel fin de nivation.

Des accumulations de neige provoquent le développement de microterrasses de solifluxion-nivation, car c'est aux pieds des flaques de neige où les changements de la température autour de 0° ont lieu. C'est cela qui a pour l'effet une désintégration nivale du sol. Le sol acquiert donc le caractère tixotrope. Le processus est favorisé par un apport constant de l'eau de fonte des neiges qui, en forme de bandes étroites se maintiennent près de la bordure supérieure de la terrasse, souvent même jusqu'au milieu de l'été.

Les observations sur le terrain permettent de remarquer le fait suivant. Dans la littérature on emploie fréquemment de telles notions que *traînées de déluvions* ou *versants de déluvions*, en parlant des formes d'accumulation de versants doux ou de celles de leurs pieds. Un large développement des sols structurés et des loupes de solifluxion à la surface de ces formes, tout étant en rapport avec le caractère tixotrope du sol et son mouvement, ce sont les faits qui, d'une façon très nette, témoignent de l'action limitée et restreinte du processus déluvial (au cours du temps de développement des formes structurées du sol au moins). Le microrelief structuré et les formes de solifluxion sont donc deux phénomènes étroitement

liés l'un à l'autre par les caractères tixotropes des sols participant à leur formation. On peut les considérer comme l'indicateur de mobilité des couches superficielles aux versants.

Au Caucase du Nord nous avons observé des sols tixotropes affleurant aux versants raides de profondes gouttières creusées dans des dépôts morainiques. Ici, la destruction de la structure tixotrophe du sol et son déversement massif au lit de la rivière peut provoquer un vrai phénomène de lave torrentielle.

Le trait particulier des formations tixotropes glaciaires et de celles de versants, dans les hautes montagnes est leur grossièreté et une humidité interne faible. La tixotrophie des dépôts sableux, tant morainiques que déluviaux, peut se produire au moment où le contenu en fraction argileuse atteint 5% et l'humidité 6—13%. Mais même de très grossiers dépôts morainiques et des formations de pente peuvent passer à l'état liquide d'une masse boueuse quand leur équilibre interne est ébranlé, tout cela se passant aux dépens de leur propre humidité interne exclusivement. Un tel processus est pourtant nettement limité au temps. Il ne se produit qu'au temps où le sol est le plus humide, c'est-à-dire, en général, au début de l'été.

Comme on voit le phénomène de la tixotrophie, le couple des conditions — contenu en fraction argileuse et humidité — étant en état optimum, peut se réaliser dans des sols à la composition granulométrique très variable, de compacts sols argileux à des sables à grain divers. Le caractère tixotrophe des sols, comme le facteur prédominant le développement du microrelief de pergélisol aux pays du Nord et dans les hautes montagnes, permet de révéler un nombre défini de formes de relief dont la genèse est liée à la destruction de la stabilité du sol sans un apport extérieur de l'humidité.

La manifestation de la tixotrophie du sol à l'intérieur d'un système fermé, déterminé par un réseau de fentes de dessication, mène au développement du microrelief structuré — flaques de terre, polygones et cercles de pierres au degré de ségrégation variable, buttes minérales etc.

La manifestation du phénomène de la tixotrophie là où il n'y a pas de systèmes fermés mène à la mise en place, aux versants, du microrelief amorphe. Le mouvement lent du sol donne des terrasses et des loupes de solifluxion. Le mouvement rapide — des coulées boueuses de moyenne envergure. Dans des conditions exceptionnellement favorables, le mouvement catastrophique, extrêmement rapide du sol peut donner naissance au phénomène de la lave torrentielle — l'écoulement de l'eau surchargée de débris, entraînant même de très gros blocs.

Traduction de T. Kubiak



Photo de J. V. Mudrov

Photo 1. Flaques de terre (*pyatna medaliony*). La haute montagne de Touva



Photo de J. V. Mudrov

Photo 2. Polygones de pierres au fond du lac. La haute montagne de Touva



Photo de J. V. Mudrov

Photo 3. Sols striés, au matériel trié, au versant doux de solifluxion. La haute montagne de Touva