

A. I. Popov

Moscou

## LES LOESS ET DÉPÔTS LOESSOÏDES, PRODUIT DES PROCESSUS CRYOLITHOGÈNES

Il est connu que la genèse des loess et des dépôts ressemblants pose un problème complexe du point de vue de la géologie et de la géographie qui, à nos jours, ne peut pas être considéré comme résolu.

Les diverses opinions qui en traitent, aussi nombreuses que complexes, rendent la tâche encore plus difficile. En les analysant, il faut souligner qu'il n'y a pas d'hypothèse générale sur la genèse des loess, ni de délimitation entre loess typiques et atypiques. Pourtant, les matériaux existant actuellement permettent de penser qu'on connaît les caractères les plus généraux devant isoler le groupe spécial des dépôts loessiques ainsi que de présenter quelques opinions sur leur formation.

Les traits caractéristiques des loess et des dépôts loessoïdes, considérés comme importants du point de vue morphogénétique, ont été bien décrits dans la littérature (Berg, 1947; Larionov, Priklonskij, Ananiev, 1959; Kriger, 1965 et par d'autres).

Le loess est un dépôt constitué pour la majeure partie (30–60 %) de poussières (de 0,05 à 0,001 mm), stratifié ou à stratification mal distincte, et poreux; en général, une croûte calcaire, de fer ou de manganèse recouvre des parois des pores; on n'y trouve pas de cailloux, sporadiquement des débris rocheux; il se caractérise par une structure colonnaire et par la capacité de conserver des parois verticales atteignant plusieurs dizaines ou même plusieurs centaines de mètres de hauteur.

Les opinions qui traitent du problème du loess peuvent être divisées en deux groupes principaux (Kriger, 1965). Le premier considère le loess comme un dépôt à l'origine poussiéreux (poussières éoliennes, alluviales, déluviales etc); les autres nient l'invariabilité du caractère granulométrique primaire des dépôts loessiques ou les considèrent comme secondaire, en soulignant le rôle de la transformation de diverses roches sédimentaires en poussière, sous l'action des processus de sol ou d'altération.

Le terme loessification est employé ici selon sa signification chez S. S. Neustruev, c'est à dire pour un processus physico-chimique de transformation de certaines roches-mères en produit loessoïde, secondairement fin. Berg (1947), en proposant une hypothèse pédo-éluviale des loess, emploie ce terme, ainsi qu'il parle d'une famille des dépôts loessoïdes (page 147).

L'auteur penche pour l'opinion du deuxième groupe de chercheurs et considère qu'il est possible de distinguer des roches qui peuvent être soumises à la loessification, c'est à dire subir certaines transformations spécifiques. On ne s'occupe que des quelques types de loess, dus avant tout à la cryolithogénèse. En même temps, on considère qu'un rétrécissement des notions: loess et dépôts loessoïdes aux formations résultant de la loessification n'est sans doute pas juste, et qu'il faut accorder aux chercheurs du premier groupe le droit d'employer ces termes pour les autres sédiments ressemblants, bien que d'une origine différente.

Tout en étant d'accord avec l'opinion des chercheurs considérant la plupart des loess et dépôts loessoïdes comme un produit éluvial, on est obligé de montrer les caractères de ces dépôts qui nous permettent de les interpréter principalement comme résultat de l'agent éluvial le plus important, c'est à dire des processus de gel, processus stimulant la transformation physique ainsi que chimique du substratum. Pourtant, pour les loess typiques et atypiques, si l'on fait un bilan des traits caractéristiques du loess, deux seulement, la macro-porosité et la structure colonnaire, sont caractéristiques uniquement pour ce sédiment. Tous les autres, considérés comme typiques et en général appartenant aux loess (composition poussiéreuse, contenu en carbonates, couleur paille et quelques autres), ne sont pas réservés à ces sédiments, on les rencontre dans des nombreux dépôts, tout en étant rares dans un ensemble cité.

Les deux caractères ci-dessus, réellement les plus typiques pour les loess, ne peuvent pas être expliqués de façon satisfaisante à la lumière des conceptions actuelles sur la génèse des loess. Ce n'est qu'en prenant en considération des processus de gel (Kriger, 1961) qu'on peut résoudre la question de leur origine ainsi que de la génèse de l'ensemble des dépôts loessoïdes en totalité. Aucun autre agent exogène ne donne de résultat morphogénétique semblable, en tout cas sous forme aussi nette.

Le S. V. Berg (1947) a constaté que pour qu'une roche-mère se transforme en loess, il est nécessaire qu'elle soit carbonatée et soumise à une altération sous un climat sec. Il considère que l'incohérence et la porosité du loess résultent de la grande teneur en calcaire de la roche-mère (etc.). Il est généralement connu que la porosité et les autres traits typiques du loess caractérisent les limons non carbonatés ressemblant au loess, qu'on trouve en Russie centrale ainsi que dans sa partie nord-est, par exemple aux

alentours de Vorkuta. Ce fait certifie que la porosité du loess est sans doute liée à son contenu en carbonates ainsi qu'à un climat sec.

Réellement, on va le montrer ci-dessous, un climat relativement sec et une humidité peu élevée du substratum jouent un rôle important au cours du processus de loessification.

L'analyse d'une carte montrant la répartition des loess et dépôts loessoïdes peut jouer en faveur de l'opinion qu'on les trouve dans les régions au sol gelé saisonnièrement. Si l'on y ajoute qu'ils s'étendent sous forme de nappes, ainsi que quelques autres caractères, on est obligé de considérer les cycles saisonniers gel-dégel comme agent actif de la loessification.

Il faut signaler que les dépôts loessoïdes ne se forment qu'au cours d'une transformation cryogène du substratum (Popov, 1962; Konichtchev, 1965). Berg (1947), en citant des exemples de la formation actuelle du loess en Yakoutie, montre que le processus est favorisé par l'été chaud avec des précipitations peu abondantes, c'est à dire par un climat sec. Berg passe sous silence le rôle du gel de sol saisonnier dans le processus de désagrégation des roches de Yakoutie bien que, en même temps, il ne néglige pas de l'importance des processus de gel. Il écrit: «à propos du pergélisol, il ne peut favoriser la formation des limons loessoïdes que sous le climat sec de la Yakoutie centrale» (Berg, 1947, page 191). Si, dans le fragment cité, on remplace le mot «pergélisol» par le terme «sol gelé saisonnièrement», on ne peut pas douter de sa justesse.

Parmi tout ce qu'on a dit à propos du processus de loessification, il faut rappeler l'opinion de Gerasimov et Markov (1939) sur la formation des «loess froids» de Yakoutie. A. A. Kireev (1961) parle également du caractère cryogène des loess de la Russie du Sud. A. K. Larionov (1959), E. M. Sergeev et A. V. Minervin (1960) considèrent l'action de gel comme très important dans le processus de loessification.

On peut observer l'analogie de la structure du loess avec celle du matériel fin des sols structuraux de la toundra, du type «piatne-medaliony». L'analogie est visible dans l'abondance des pores, la structure colonnaire et le manque de stratification, sans parler de la composition presque totalement poussiéreuse du matériel. Elle joue en faveur d'une liaison génétique de certaines espèces des loess et de l'altération cryogène s'affectant à la toundra actuelle. Ainsi, dans les deux cas mentionnés, il faut parler de la loessification dans laquelle les processus de gel jouent un des rôles les plus importants. Cela dit, il faut poser la question: qu'est ce qui a de plus important dans la loessification considérée comme agent cryo-éluvial?

Des dépôts presque totalement poussiéreux, dans lesquels on ne trouve pratiquement de débris rocheux de plus grandes dimensions, sont un produit définitif de l'altération cryogène (Popov, 1967). Il faut y ajouter que, sous

l'influence des cycles gel-dégel, les particules argileuses s'accumulent en agrégats aux dimensions répondant à la fraction poussiéreuse.

La plupart des auteurs expliquent la porosité des loess par la présence ancienne des racines végétales. Pourtant, dans de nombreux cas, la forme et la répartition réciproque des pores excluent une participation de cet agent. L'orientation la plus courante de certains pores tubulaires des loess, celle qui approche la verticale, est également caractéristique pour le matériel fin des sols structuraux de toundra, privés cependant de végétation. Dans ce cas-là, la porosité résulte d'une migration des eaux et des solutions de sel au cours de la congélation, vers la surface du refroidissement. Elle se lie également à la formation de la glace dans les pores et des fissures de dessiccation, formées au-dessous de la surface de congélation, dans le sol non gelé au cours de cette période-là.

Il paraît que la structure colonnaire est liée génétiquement aux grands pores et résulte d'une formation annulaire systématique de la glace dans les plus grandes fissures verticales. Une répartition généralement perpendiculaire des intercalations de glace (structure cryogène polyédrique) marque le dessin de la structure colonnaire des loess (Kireev, 1961).

Le développement systématique de cette glace lors de la congélation fait que le matériel fin des colonnes est de plus en plus cohérent, ce qui favorise leur persistance au cours de la saison de dégel.

Des sels précipités sur les parois des pores et des fissures peuvent ne pas être dissous par les eaux de fonte et s'accumuler sur les parois, en les faisant plus résistantes.

Il est connu que, sous une grande humidité, les loess se caractérisent par une capacité de tassement, s'effectuant, outre autres, par la destruction du squelette de sel mentionnée ci-dessus. Il est intéressant et prouvé par de nombreux chercheurs (Berg, 1947, p. 288), que les loess tassés peuvent, au bout d'un certain temps, retrouver leur capacité de tassement grâce à la reconstruction de la structure poreuse, fortifiée par les précipitations de sel. Il semble que les cycles saisonniers gel-dégel, provoquant une migration continue des eaux et des sels vers la surface, sont l'agent le plus puissant et de plus stable durée, qui favorise la formation de la porosité et de la structure caractéristique.

La loessification se compose de deux processus de base, conditionnés par les cycles gel-dégel:

(1) désagrégation mécanique des particules de diverses dimensions jusqu'à la fraction poussiéreuse; simultanément, l'aggrégation des colloïdes en particules de cette fraction a lieu, c'est à dire que des dépôts homométriques se forment;

(2) formation de la structure colonnaire et de la porosité dans un

sédiment poussiéreux d'origine, ou devenu tel en résultat des cycles gel-dégel.

Donc la prépondérance de la fraction de poussières grossières dans un dépôt loessifié (de 30 à 60 %) est, indépendamment de sa genèse, la condition nécessaire pour que la porosité et la structure colonnaire puissent se former.

Cependant, une certaine humidité optima est nécessaire (plus basse que la limite de fluidité) pour que les caractères discutés soient produits par les processus cryogènes. C'est à dire un climat relativement sec est indispensable. Dans un autre cas, lors du dégel du sol, les pores et la structure colonnaire ne se conserveront pas, ainsi que les croûtes de calcium ne se formeront pas sur les parois des pores.

A la lumière de ce qu'on a dit ci-dessus, il faut considérer certains types de loess comme des cryopoussières étant le résultat de la désagrégation par le gel. Alors, la notion de «loess» a, selon l'auteur, une signification génétique, de principe.

La connaissance encore faible des processus de cryodésagrégation en question, n'a permis de distinguer que deux modes, de base semble-t-il, de la formation des dépôts cryogènes poussiéreux:

(1) formation des cryopoussières affectant tout le mollisol, en conséquence de cycles saisonniers gel-dégel. En résultat, deux types de dépôts ressemblant se forment: les limons loessoides de couverture et les loess;

(2) formation de cryopoussières dans une couche mince (de plusieurs centimètres d'épaisseur) du mollisol, tout près de la surface et en résultat de l'activité des processus de nivation. Dans ce cas là, on a des dépôts fins du type nival qui se forment.

Sous les conditions de la zone polaire ainsi que, partiellement, dans la zone de climat tempéré, on peut observer la formation de limons loessoides de couverture, peu épais. Le plus souvent, les limons ne contiennent pas de carbonates ils sont moins poreux que les vrais loess et ne montrent pas une tendance au tassement. Les dépôts de ce type se lient génétiquement au mollisol peu profond et à une humidité de sol relativement grande. Sous ces conditions, les parois des pores, se formant au cours de la congélation périodique, sont fortifiés de croûtes de fer (oxydes de fer) et de manganèse (oxydes de manganèse) qui, contrairement aux carbonates de calcium, sont peu exposées à la dissolution.

Sous les conditions du climat tempéré sec, avant tout celui qui est très continental, quelques variétés des loess se forment. En général, ils contiennent des carbonates, sont très poreux et montrent une capacité au tassement. La formation des loess résulte des cycles gel-dégel bien profonds, souvent affectant une couche de plusieurs mètres, et de la sécheresse relative du climat, grâce à laquelle les parois des pores sont fortifiés avant tout par le carbonate de calcium, ce qui, à son tour, fait naître une capacité au tassement.

En plus, il faut souligner que l'accroissement plus rapide des croûtes de sel sur les parois des pores formées dans les loess, en comparaison de celui de limons de couverture, n'est pas uniquement l'effet de l'humidité moyenne ou faible de sol mais, également, de l'activité chimique des eaux de sol. La dernière est favorisée par les hautes températures d'été ainsi qu'une grande concentration de sel dans les eaux. C'est pourquoi, les processus de loessification sont beaucoup plus expressifs au Sud que sous les conditions polaires.

La formation de matériel fin nival est caractéristique pour les régions à épaisse couverture neigeuse, à la lente fonte printanière de neige et aux fréquents passages de la température par  $0^{\circ}\text{C}$  (à l'échelle d'une saison ou même d'un jour). Justement la courte durée et simultanément la grande fréquence des cycles gel-dégel, qui sont à la base du caractère spécifique de la nivation, sont considérés comme processus cryoéluvial.

Des particularités de beaucoup de loess, principalement de ceux qui ont une grande épaisseur, atteignant plusieurs dizaines et peut être même plusieurs centaines de mètres, deviennent claires si on imagine la transformation épigénétique des sédiments s'accumulant graduellement (surtout les alluvions). La transformation est réalisée par la cryolithogénèse saisonnière ainsi que par la diagénèse, au fur et à mesure, d'un enfoncement des sédiments et leur sortie de la zone de la cryolithogénèse saisonnière.

Ce phénomène n'est possible que sous les conditions d'une accumulation suffisamment lente, au cours de laquelle l'activité de la cryolithogénèse saisonnière est simultanée à l'absence du pergélisol, c'est à dire il faut qu'on soit dans le domaine du climat continental, mais pas trop sévère.

Les caractères des loess épais suggèrent de les considérer comme des dépôts cryogènes, bien qu'il semble qu'ils ne sont pas formés uniquement en résultat des processus gel-dégel.

Au fur et à mesure que l'épaisseur du mollisol diminue et que la vitesse de l'accumulation syngénétique augmente (par exemple l'accumulation fluviatile), une couche récemment formée devient de plus en plus vite une partie du pergélisol, c'est à dire, au total, est soumise à des cycles saisonniers gel-dégel de moins en moins nombreux. (En résultat le dépôt n'est que peu transformé par les processus cryogènes. Dans le cas d'un mollisol très peu épais avec en plus une accumulation très intense, les effets de l'activité de l'altération due aux cycles gel-dégel ne seront pas du tout marqués.)

Les plaines alluviales du Nord nous donnent l'exemple, d'une région au mollisol peu épais qui fait devenir les sédiments sableux et poussiéreux partie de pergélisol avant qu'ils puissent être loessifiés.

Au fur et à mesure de l'augmentation de l'épaisseur du mollisol et, simultanément, de la réduction de l'accumulation, la période au cours de laquelle une couche nouvellement formée ne fait pas partie du pergélisol est de plus

sédiment poussiéreux d'origine, ou devenu tel en résultat des cycles gel-dégel.

Donc la prépondérance de la fraction de poussières grossières dans un dépôt loessifié (de 30 à 60 %) est, indépendamment de sa genèse, la condition nécessaire pour que la porosité et la structure colonnaire puissent se former.

Cependant, une certaine humidité optima est nécessaire (plus basse que la limite de fluidité) pour que les caractères discutés soient produits par les processus cryogènes. C'est à dire un climat relativement sec est indispensable. Dans un autre cas, lors du dégel du sol, les pores et la structure colonnaire ne se conserveront pas, ainsi que les croûtes de calcium ne se formeront pas sur les parois des pores.

A la lumière de ce qu'on a dit ci-dessus, il faut considérer certains types de loess comme des cryopoussières étant le résultat de la désagrégation par le gel. Alors, la notion de «loess» a, selon l'auteur, une signification génétique, de principe.

La connaissance encore faible des processus de cryodésagrégation en question, n'a permis de distinguer que deux modes, de base semble-t-il, de la formation des dépôts cryogènes poussiéreux:

(1) formation des cryopoussières affectant tout le mollisol, en conséquence de cycles saisonniers gel-dégel. En résultat, deux types de dépôts ressemblant se forment: les limons loessoides de couverture et les loess;

(2) formation de cryopoussières dans une couche mince (de plusieurs centimètres d'épaisseur) du mollisol, tout près de la surface et en résultat de l'activité des processus de nivation. Dans ce cas là, on a des dépôts fins du type nival qui se forment.

Sous les conditions de la zone polaire ainsi que, partiellement, dans la zone de climat tempéré, on peut observer la formation de limons loessoides de couverture, peu épais. Le plus souvent, les limons ne contiennent pas de carbonates ils sont moins poreux que les vrais loess et ne montrent pas une tendance au tassement. Les dépôts de ce type se lient génétiquement au mollisol peu profond et à une humidité de sol relativement grande. Sous ces conditions, les parois des pores, se formant au cours de la congélation périodique, sont fortifiés de croûtes de fer (oxydes de fer) et de manganèse (oxydes de manganèse) qui, contrairement aux carbonates de calcium, sont peu exposées à la dissolution.

Sous les conditions du climat tempéré sec, avant tout celui qui est très continental, quelques variétés des loess se forment. En général, ils contiennent des carbonates, sont très poreux et montrent une capacité au tassement. La formation des loess résulte des cycles gel-dégel bien profonds, souvent affectant une couche de plusieurs mètres, et de la sécheresse relative du climat, grâce à laquelle les parois des pores sont fortifiés avant tout par le carbonate de calcium, ce qui, à son tour, fait naître une capacité au tassement.

En plus, il faut souligner que l'accroissement plus rapide des croûtes de sel sur les parois des pores formées dans les loess, en comparaison de celui de limons de couverture, n'est pas uniquement l'effet de l'humidité moyenne ou faible de sol mais, également, de l'activité chimique des eaux de sol. La dernière est favorisée par les hautes températures d'été ainsi qu'une grande concentration de sel dans les eaux. C'est pourquoi, les processus de loessification sont beaucoup plus expressifs au Sud que sous les conditions polaires.

La formation de matériel fin nival est caractéristique pour les régions à épaisse couverture neigeuse, à la lente fonte printanière de neige et aux fréquents passages de la température par 0°C (à l'échelle d'une saison ou même d'un jour). Justement la courte durée et simultanément la grande fréquence des cycles gel-dégel, qui sont à la base du caractère spécifique de la nivation, sont considérés comme processus cryoéluvial.

Des particularités de beaucoup de loess, principalement de ceux qui ont une grande épaisseur, atteignant plusieurs dizaines et peut être même plusieurs centaines de mètres, deviennent claires si on imagine la transformation épigénétique des sédiments s'accumulant graduellement (surtout les alluvions). La transformation est réalisée par la cryolithogénèse saisonnière ainsi que par la diagénèse, au fur et à mesure, d'un enfoncement des sédiments et leur sortie de la zone de la cryolithogénèse saisonnière.

Ce phénomène n'est possible que sous les conditions d'une accumulation suffisamment lente, au cours de laquelle l'activité de la cryolithogénèse saisonnière est simultanée à l'absence du pergélisol, c'est à dire il faut qu'on soit dans le domaine du climat continental, mais pas trop sévère.

Les caractères des loess épais suggèrent de les considérer comme des dépôts cryogènes, bien qu'il semble qu'ils ne sont pas formés uniquement en résultat des processus gel-dégel.

Au fur et à mesure que l'épaisseur du mollisol diminue et que la vitesse de l'accumulation syngénétique augmente (par exemple l'accumulation fluviatile), une couche récemment formée devient de plus en plus vite une partie du pergélisol, c'est à dire, au total, est soumise à des cycles saisonniers gel-dégel de moins en moins nombreux. (En résultat le dépôt n'est que peu transformé par les processus cryogènes. Dans le cas d'un mollisol très peu épais avec en plus une accumulation très intense, les effets de l'activité de l'altération due aux cycles gel-dégel ne seront pas du tout marqués.)

Les plaines alluviales du Nord nous donnent l'exemple, d'une région au mollisol peu épais qui fait devenir les sédiments sableux et poussiéreux partie de pergélisol avant qu'ils puissent être loessifiés.

Au fur et à mesure de l'augmentation de l'épaisseur du mollisol et, simultanément, de la réduction de l'accumulation, la période au cours de laquelle une couche nouvellement formée ne fait pas partie du pergélisol est de plus