

*Urszula Urbaniaak
Varsovie*

LES SABLES DE COUVERTURE, LES CRYOTURBATIONS ET LES FRACTURES DANS LES DUNES DU BASSIN DE PŁOCK

Abstract

Investigations on the dunes in the Płock Basin revealed secondary deformation in stratified sands and interruption of layers as well as their complete destruction. These phenomena are classified in two groups: (a) covering sands and cryoturbation structures originated under the periglacial climatic conditions, and (b) changes of the dips of layers and the fault-like structures due to the melting of dead ice blocks under the dunes or in their close vicinity.

The covering sands are represented by the structureless sands lying in the top of all dunes and by marble-like sands occurring at their bottoms. In comparison with the stratified sands they are much finer, less rounded, and richer in strongly resistant minerals in their heavy-mineral content. The covering sands originated in the result of the activity of frost weathering in periglacial climate and later soil processes.

Among the cryoturbation structures there were distinguished the fissure and solifluxion forms. These arose due to the local existence of an active layer on the dunes in some periods of the year when the periglacial conditions temporarily occurred. The local cooling of the climate might result from the presence of shallow buried dead ice which preserved lakes and dead-ice hollows.

The melting of dead ice caused some disturbances in the parallel stratification of sands and even small faults observed on the slopes of the dunes occurring in the neighbourhood of the dead-ice hollows. The range and position of the disturbances show that the eolian process preceded the melting of dead ice or that both these processes sometimes overlapped.

L'INTRODUCTION

Les études sur l'âge des dunes menées ces dernières années sur le territoire de la Pologne nous permettent de reculer la phase principale de formation des dunes jusqu'au Tardiglaciaire. Certains auteurs (H. Posser, 1948; R. Galon, 1959; B. Krzygowski, 1961) remontent même la formation des dunes de la Plaine Européenne jusqu'à la phase de déclin du Stade Poméranien. Les dunes se développaient donc à l'intérieur de la zone périglaciaire et le fait de les considérer comme faisant partie du complexe morphologique périglaciaire n'est pas une innovation. Dans le domaine

périglaciaire régnaien t les processus morphogénétiques périglaciaires transformant la structure de la zone active. Il y a eu forcément, pendant de certaines saisons au moins, des conditions favorisant la gélivation et, par la suite, le développement de la solifluxion et même congéligelation — des coulées de versant.

Les processus de solifluxion s'observent sur les dunes même à l'époque actuelle. La manifestation de coulées de sable humide, dégelé, sur un substrat gelé est décrite par J. Kobendzina (1961) aux versants raides des dunes de la Forêt de Kampinos dépourvues du tapis végétal. Les coulées observées vers la fin du février sont appelées par elle micro-congéligelation. A côté des coulées J. Kobendzina observe, au printemps, des fissures superficielles et des éboulements du sable sur la face sous le vent, liés à la fusion des couches de neige ensevelies par du sable.

Les processus analogues à une plus grande échelle ont été observés par St. G. Berquist (1935) sur les dunes aux bords du Lac Supérieur. En hiver la neige s'accumule sur la face sous le vent à la surface du sable. Le sable frais l'ensevelit jusqu'à la profondeur de plusieurs pieds. Ceci démontre une activité éolienne considérable en hiver. (J. Kobendzina, 1961 émet l'opinion analogue au sujet des aires dunaires de la Pologne: „Les processus éoliens les plus forts prennent place en hiver pendant de grandes gelées“). La neige ensevelie si profondément tend, selon Berquist, à se transformer en glace. Isolée par la couche de sable elle peut se conserver jusqu'au mi-juin. Quand la glace ainsi enterrière fond enfin, des craquelures et ensuite des fissures se manifestent au versant; les masses de sable glissent vers le bas, parfois il y a des décollements violents qui dévoilent un versant nouveau, plus raide que l'angle de frottement interne.

On peut supposer que des phénomènes analogues accompagnaient le processus de la formation des dunes sur le territoire de la Pologne. Le fait qu'on ne trouve pas d'information dans la littérature sur la présence de structures périglaciaires dans les dunes résulte de la connaissance encore insuffisante de la structure dunaire interne, de même que de leur faible netteté due à la faible différenciation de la couleur et de la taille des grains de sable dunaire.

La première remarque au sujet des structures périglaciaires dans les dunes peut être trouvée dans la note non publiée de I. Drzewicka (1953). Analysant une coupe dans la dune près de Dobrzyków (Bassin de Płock) l'auteur a constaté la présence de

sables humides, compacts, à structure marmorisée, c'est-à-dire à des taches, plissottements et traînées plus et moins foncés — au-dessous de la série de sables de couverture de 75 cm d'épaisseur (sables poudreux, secs, à des restes organiques). La manifestation de la structure marmorisée est liée, selon l'auteur, à des processus de gel (oscillations de température et d'humidité fortes et fréquentes) qui pouvaient avoir lieu dans la zone périglaciaire.

La première annonce de la présence des cryoturbations tout à fait nettes dans les dunes est due à U. Urbaniak (1962).

Un peu d'attention pour ce problème montre W. Stankowski (1963) qui sur les dunes du sandre de Nowy Tomyśl, aux versants au vent et à la limite entre la série stratifiée et amorphe, a observé „des fragments de structures rompus par des lits de sable recourbés, différent un peu quant à la granulométrie”. Aux faces sous le vent il a constaté la présence de structures périglaciaires isolées, au caractère de coulées, et une „fente de gel” dont la genèse lui semble énigmatique.

L'analyse détaillée de la structure interne de plusieurs dunes au Bassin de Płock nous permet de constater que les dunes, en ses profils entiers, sont constituées par des sables stratifiés.

Dans plusieurs dunes il y a des déformations caractéristiques de la structure stratifiée, rompant la continuité des strates, ou bien les effaçant complètement. Après une analyse soigneuse nous les avons reconnues comme l'effet de deux processus et divisées en deux groupes génétiques: (a) sables de couverture et cryoturbations liés au climat périglaciaire, (b) fractures rappelant de petites failles ou modifications des pendages des strates, liées à la fusion des blocs de glace morte gisant au-dessous des dunes ou dans leur voisinage immédiat.

SABLES DE COUVERTURE

C'est une couche de sables amorphes enveloppant presque toutes les dunes d'un manteau dont l'épaisseur dépasse rarement 2 m. Au sommet des sables de couverture s'est formé l'horizon du sol. A la base, ils passent, d'habitude sans une nette limite, à des sables stratifiés. L'épaisseur des couvertures est souvent variable — plus importante aux versants qu'aux sommets — aux bords de la route traversant la dune au N de Lucien par exemple

où le sable stratifié apparaît à la profondeur de 20 cm au point culminant de la dune et de 2 m au versant sud.

On a ramassé des échantillons de sable sur 10 dunes et comparé la granulométrie du sable sans structure avec celle du sable stratifié. Les résultats sont comme il suit: (a) le sable amorphe est plus fin que le sable stratifié (dune à Czarne); (b) le sable amorphe est plus grossier que le sable stratifié (fig. 1 — dune de Krzywie). Dans certains cas ces différences sont minimales. Partout pourtant les grains les plus grossiers se rencontrent surtout dans le sable stratifié, tandis que la fréquence de fractions les plus fines est plus forte dans le sable amorphe.

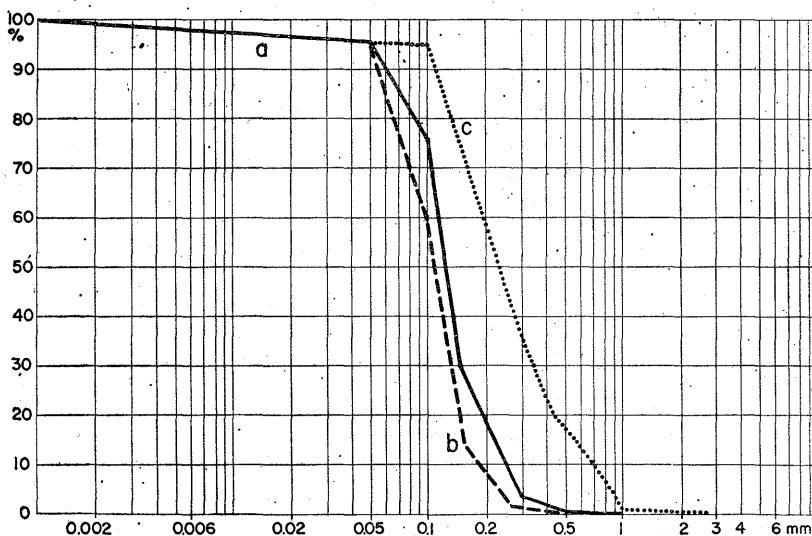


Fig. 1. Courbes granulométriques du sable dunaire de Krzywie
 a — sable stratifié provenant de la profondeur de 2 m; b — sable stratifié provenant de la profondeur de 6 m; c — sable amorphe

La comparaison de l'usure montre que la proportion des grains ronds mats est plus forte dans le sable stratifié. Le nombre des non usés est plus grand dans le sable amorphe.

Tous ces faits nous permettent de tirer des conclusions générales. La couche amorphe constitue probablement l'effet de la gélification sous un climat périglaciaire. Ceci est démontré par une plus forte désagrégation du matériel et une usure plus faible par rapport au sable stratifié.

C'est aussi l'analyse des minéraux lourds qui parle en faveur de la genèse gélique des sables amorphes. Dans ce sable il y a plus de minéraux très résistants (zircon, tourmaline) par rapport au sable stratifié et nettement moins de minéraux tendres comme pyroxène et amphibole (fig. 2 — dune à Czarny Borek).

Au même temps que le développement de la couverture désagrégée le matériel désagrégé se déplaçait vers le bas des versants. Le processus menait à l'effacement de la netteté du relief dunaire, à l'abaissement des formes et à l'adoucissement des versants, surtout de leur pieds. Plusieurs dunes possèdent des limites morphologiques peu nettes, même aux pieds de la face sous le vent. La différence en puissance de sables de couverture, mentionnée tout à l'heure résulte du même processus aussi.

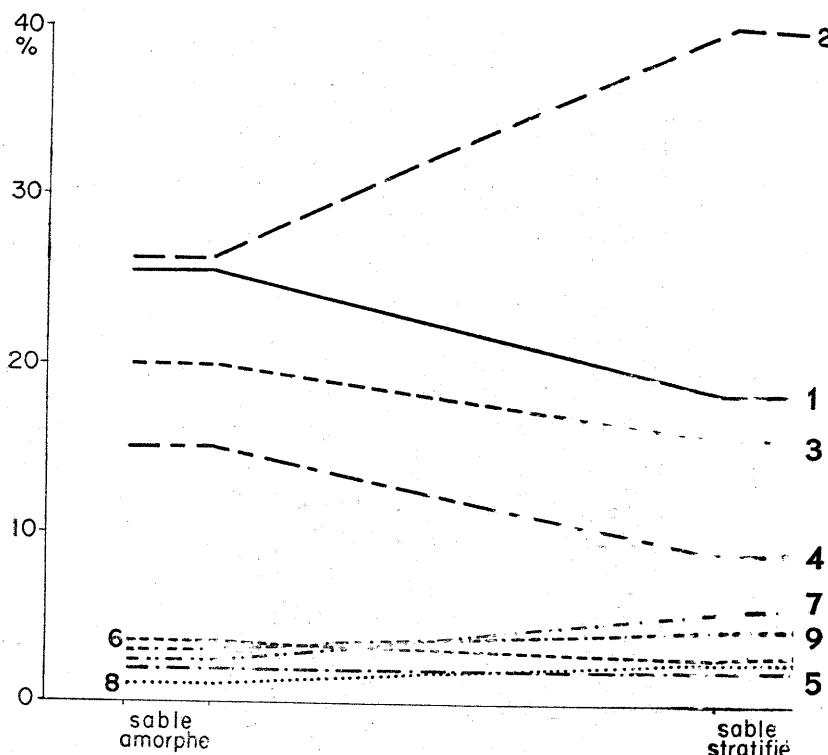


Fig. 2. Contenu en minéraux lourds dans le sable amorphe et stratifié

provenant de la dune de Czarny Borek

1. grenat; 2. amphibole; 3. zircon; 4. tourmaline; 5. rutile; 6. épidoite; 7. pyroxène;
8. staurotide; 9. disthène

Les sables amorphes témoignent de l'existence du climat péri-glaciaire à l'époque où le processus éolien s'était en principe terminé et les dunes n'étaient pas encore protégées par un manteau continu de sol et de végétation. L'activité du vent se limitait au déplacement du matériel à l'intérieur des champs de dunes tout formées et à l'évacuation des poudres et des sablons de la série superficielle. D'où le phénomène de l'enrichissement relatif des sables amorphes en grains grossiers mentionné tout à l'heure (fig. 1).

L'épaisseur de la couche superficielle amorphe dépend de la durée des conditions facilitant la désagrégation, donc de l'âge des

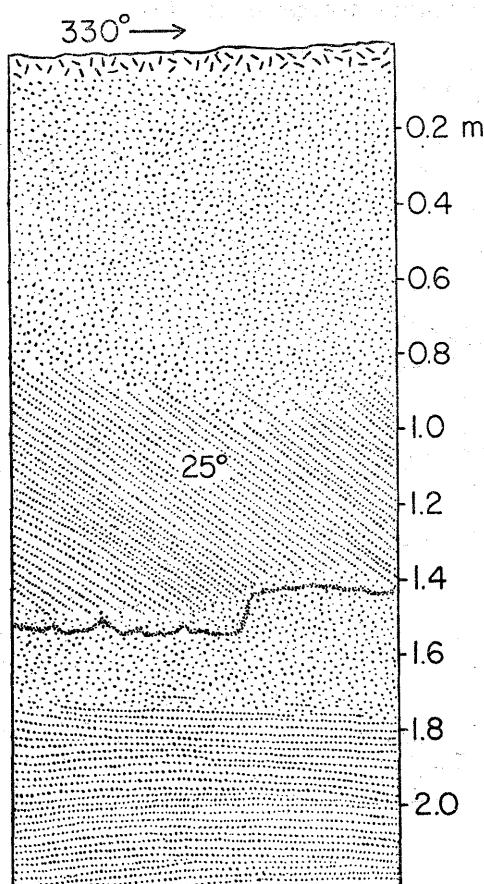


Fig. 3. Sable amorphe situé entre les deux séries de sable stratifié dans la dune éloignée de 6 km au sud de Duninów Nowy

dunes aussi. Les dunes des terrasses de la Vistule possèdent d'habitude une couche de sable amorphe moins développée. L'épaisseur de la couche amorphe ne peut pourtant pas constituer une indication de l'âge de la dune, car elle peut être détruite plus tard, surtout sur les dunes inhabitées depuis longtemps par l'homme. A côté de la gélification ce sont les processus pédogénétiques qui ont dû contribuer au développement de la couche amorphe.

La série superficielle amorphe mise à part les dunes qui ne sont constituées que par des sables stratifiés. Cela indique qu'il y a eu continuité du processus éolien. Il n'y a que deux dunes dans lesquelles on a observé des structures indiquant des ruptures périodiques en accumulation du sable. Dans la dune située à 6 km à peu près vers le sud de Duninów Nowy il y a une couche de sable amorphe de 10 à 15 cm d'épaisseur, avec une participation considérable des grains de 1 mm (fig. 3). Dans la dune de Goren Duży, à la limite de deux séries sableuses on a constaté la présence d'une zone de cryoturbations en forme de petits anticlinaux et synclinaux (fig. 4).

Dans quelques dunes, à la base des sables de couverture, il y a une couche de sable à structure marmorisée, d'épaisseur variable. Après J. Drzewicka (1953) nous usons la notion

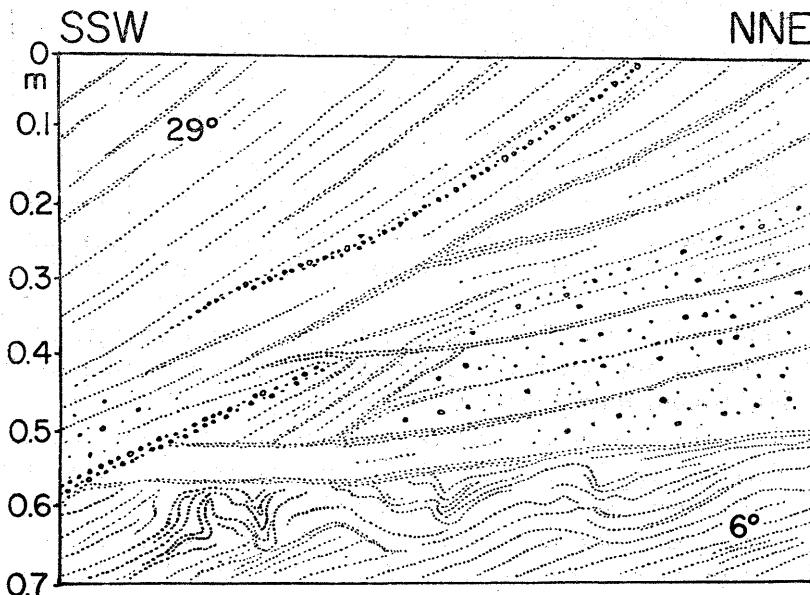


Fig. 4. Zone intermédiaire entre les deux phases de développement du cordon dunaire à Goren Duży

structure marmorisée afin de désigner de petits plissottements, vagues et traînées. De telles structures sont relativement nettes à cause de teinte différenciée — le sable plus foncé forme le fond sur lequel se dessinent des structures en miniature, formées de sable un peu plus clair, presque blanc, comme dans la dune de Warzachewka par exemple (fig. 5). (La couleur résulte de l'accumulation du CaCO_3 dans la zone de sables à structure marmorisée. Cela montre qu'il y avait eu des différences en infiltration entre le

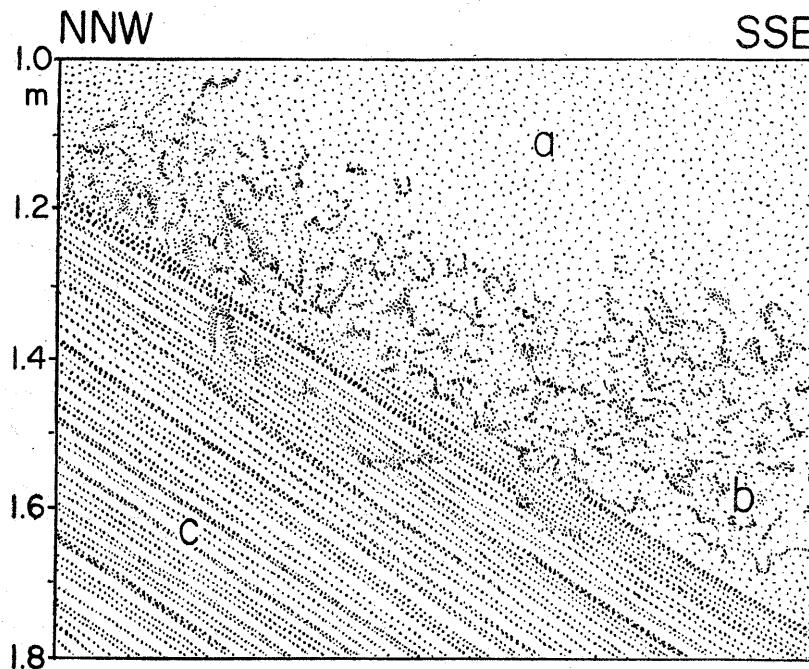


Fig. 5. Zone de structures marmorisées (b) développée à la limite entre du sable amorphe (a) et stratifié (c) dans la dune de Warzachewka

sable amorphe et stratifié, à la base). Les contours des structures sont accentués un peu par des bandes sableuses un peu plus foncées, légèrement ferrugineuses.

A l'intérieur de cette série il y a parfois des strates nettes de sable ferrugineux, brun-clair, plissées, irrégulières et discontinues. On les a observées dans la dune de Sędeń entre autres (fig. 6). Dans certaines dunes on a constaté la présence des strates de sable ferrugineux dans la partie basale des sables amorphes, donc là où d'habitude se trouve la série à structure marmorisée.

La série de sable à structure marmorisée atteint rarement

l'épaisseur de 1 m (fig. 6). Son épaisseur oscille en général entre quelques et plusieurs dizaines de cm. Le plus souvent pourtant les sables amorphes passent directement à des sables stratifiés, la limite entre les deux séries étant indistincte. La série de sable à structure marmorisée ne possède non plus de limites distinctes, passant progressivement au sable amorphe vers le haut et au sable stratifié vers le bas.

Ce n'est qu'au versant sous le vent de la dune de Warzachewka qu'on a observé une nette limite entre le sable amorphe et stratifié. La limite est ici en général horizontale et ne s'accorde pas avec la forme du versant actuel, nettement incliné ici vers le sud (fig. 7). Au-dessous de la limite irrégulière il y a encore des poches de sable amorphe, entre des sables stratifiés, à de nets contours aussi. De telles structures rappellent les pseudo-fentes de gel décrites par Maarleveld (1964). Maarleveld suppose qu'elles se sont développées en rapport avec un pergélisol peu profond au Dryas supérieur.

Dans la dune de Sedeň (fig. 6) nous avons ramassé des échantillons de trois séries de sable: amorphe, à la structure marmorisée et stratifié pour l'analyse granulométrique (fig. 8). Ce sont les différences considérables en pour cents de grains le plus fins, de 0,006 mm de diamètre, qui méritent une attention particulière. La proportion la plus forte de ces grains a été constatée dans le sable à structure marmorisée (5%). Dans les sables amorphes il y en a eu 2% et stratifiés 0,5% seulement.

La comparaison de l'usure des grains de 0,5 à 0,25 mm donne une image différente. Le nombre de grains ronds dans le sable amorphe et à structure marmorisée est presque le même, plus faible pourtant que dans les sables stratifiés (fig. 9). A la base de ces analyses la genèse du sable à structure marmorisée semble indubitable. Il s'agit du matériel désagrégé au milieu périglaciaire. Une désagrégation relativement considérable témoigne de la prépondérance de la gélification. Une opinion analogue émet I. Drzewicka (1953) rapportant le développement des structures marmorisées à des processus de gel.

On peut supposer que les structures marmorisées avaient caractérisé toute la couverture désagrégée, formée sur les dunes sous le climat périglaciaire. Le fait qu'elles ne se sont conservées qu'en restes, dans certaines dunes seulement, peut s'expliquer par une

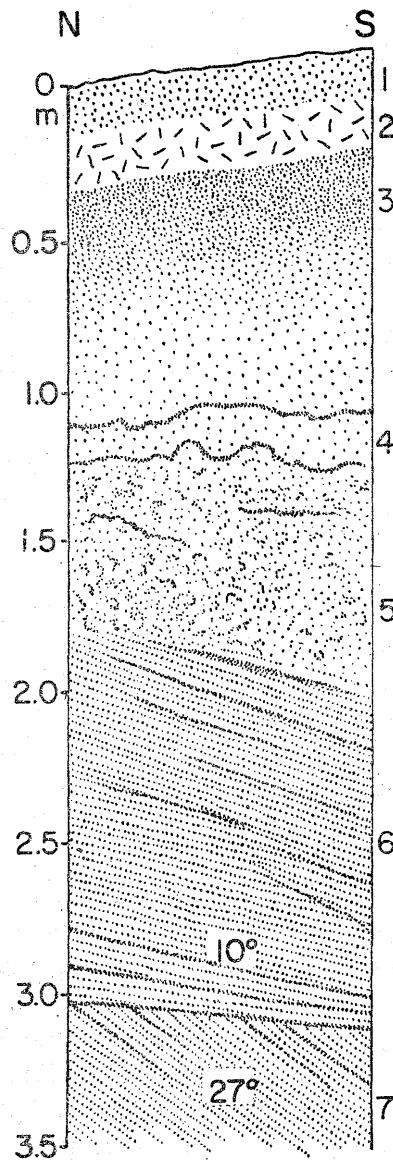


Fig. 6. Structure de la dune à Sedeń

1. sable accumulé récemment;
2. horizon d'humus;
3. sable légèrement ferrugineux;
4. sable amorphe avec des bandes ferrugineuses;
5. sable à structure marmorisée;
6. série supérieure de sable stratifié;
7. série inférieure de sable stratifié

destruction postérieure par d'autres actions climatiques, hydrologiques et pédologiques, menant à la formation de sables amorphes actuels, polygénétiques. Une proportion moindre de fraction la plus

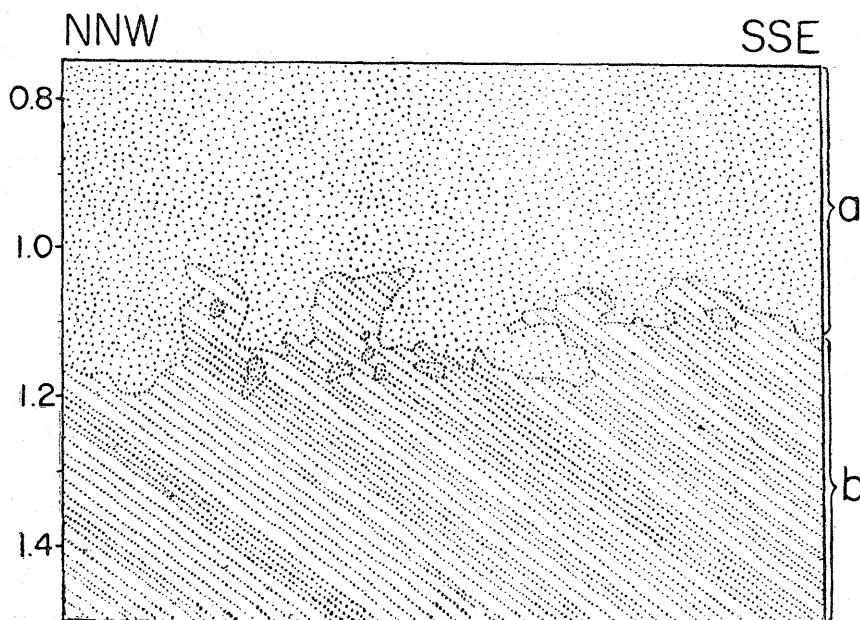


Fig. 7. La limite distincte entre le sable amorphe (a) et stratifié (b) dans la dune à Warzachewka

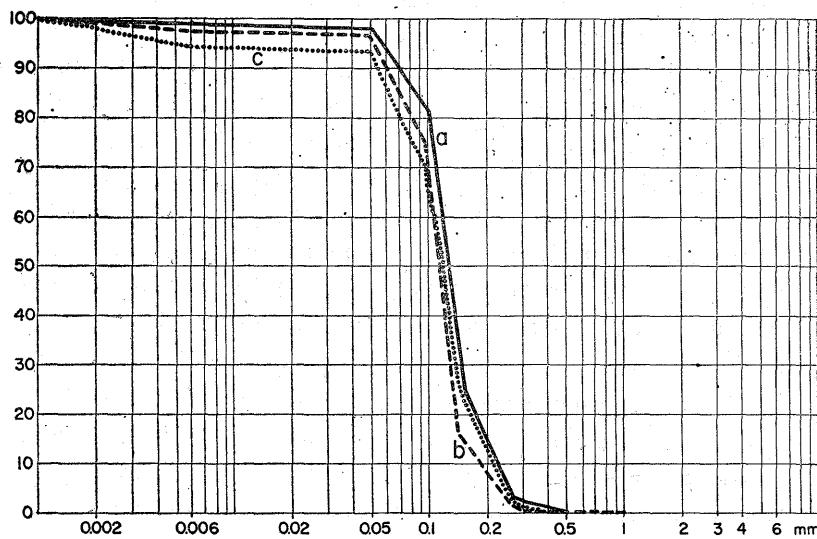


Fig. 8. Courbes granulométriques du sable provenant de la dune à Seden
 a — sable stratifié; b — sable amorphe; c — sable à structure marmorisée

fine dans les sables amorphes, par rapport à ceux à structure marmorisée témoigne plutôt de la déflation postérieure de grains fins, enrichissant relativement la série superficielle en des grains grossiers, et non pas de la moindre désagrégation due au gel.

Au sommet des sables stratifiés on observe fréquemment un effacement partiel de la structure litée par les racines de plantes, surtout arbres et arbustes. L'action des racines, de nature aussi bien mécanique que chimique, mène à la destruction locale des strates par des taches et pénétrations caractéristiques du sable blanc à des contours plus foncés, ou bien du sable à teinte jaune, cendrée ou rose. Un genre spécial de structures se manifeste ainsi. Elles se développent au sens presque vertical atteignant parfois une profondeur considérable (3 m) et possèdent des contours irréguliers. De temps en temps on peut observer un net noyau dans l'axe de la structure en forme de racine pourrie, d'humus ou de bande de sable humifère. Dans ce cas là leur genèse ne permet pas de doute. Souvent pourtant les racines ont subi une décomposition complète et des restes d'humus ont été entièrement lavées. Il ne reste que ces petites taches et pénétrations rappelant les structures marmorisées (photo 2). Elles en diffèrent pourtant par les traits caractéristiques suivants: (a) elles gardent la direction verticale, indépendamment des pendages des strates, tandis que les structures marmorisées se développent plutôt au sens horizontal et parallèle aux strates; (b) elles ne détruisent la structure litée que localement; parmi elles il y a des fragments de sable à stratification bien préservée. Dans les sables à structure marmorisée il n'y a pas de traces de stratification; (c) les structures liées aux racines peuvent se manifester à partir de la surface de la dune jusqu'à la profondeur de 2 à 3 m, aussi bien dans le sable amorphe que stratifié. La zone des structures marmorisées par contre, est nettement localisée à la limite entre ces deux séries-là et son épaisseur est relativement insignifiante.

Les différences mentionnées tout à l'heure peuvent s'observer sur les photos. La photo 1 montre une couche de sable à structure marmorisée (b), située entre du sable amorphe et stratifié, parcourant parallèlement aux couches. La photo 2 — des taches et pénétrations liées aux racines (en bas de la photo on remarque le noyau d'humus plus foncé), développées au sens vertical. Parmi les taches il y a des fragments de sable à structure stratifiée.

Il est à noter que des restes de racines calcifiées, parfois des systèmes entiers (photo 3), trouvées dans plusieurs dunes même à des profondeurs considérables (10 m) sont situées aussi dans du sable à structure litée parfaitement conservée.

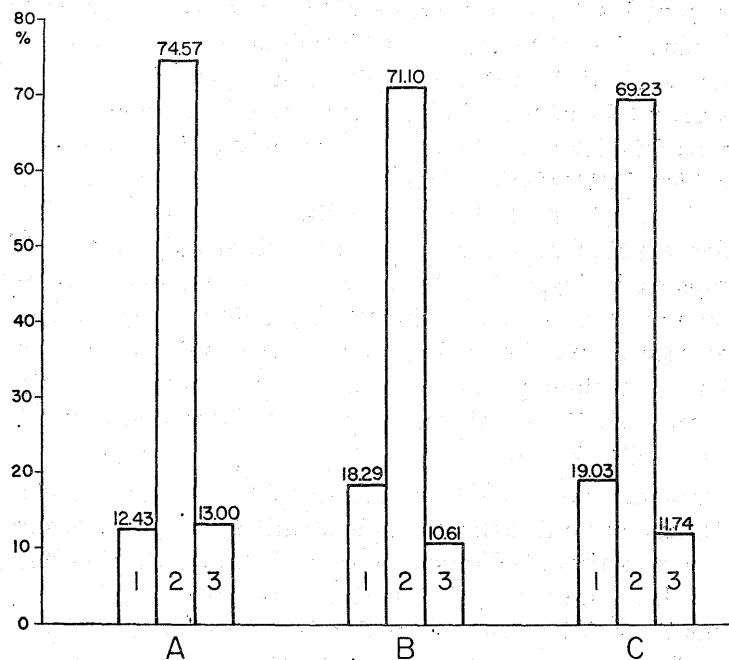


Fig. 9. Teneur des diverses classes morphoscopiques dans le sable stratifié (A), amorphe (B), et à structure marmorisée (C) provenant de la dune à Seden

1. non-usés; 2. partiellement usés; 3. bien roulés

LES CRYOTURBATIONS

A l'intérieur des sables stratifiés il y a des structures dont l'origine est liée à la présence, pendant certaines saisons au moins, de la zone active, développée sous des conditions climatiques péri-glaciaires. On les observe à des profondeurs variables, jusqu'à 4 m tout au plus. La majorité des structures a été observée aux versants au vent et aux fronts dunaires. Les structures de ce genre se manifestent dans les dunes situées sur des niveaux morphologiques variables, indépendamment de leur âge, de leur structure géologique et de l'altitude.

La présence des cryoturbations dans les dunes est un phénomène sporadique. Elles se formaient pendant des saisons chaudes, aux versants au vent surtout. Pendant des hivers périglaciaires successifs — phases d'activité éolienne la plus intense, attaquant et transformant les faces au vent — elles pouvaient subir destruction. D'autre part, les structures périglaciaires, selon A. Jahn (1951) sont dues surtout à la phase de l'avancée glaciaire maximale. On situe pourtant la période la plus ancienne de formation des dunes aux temps du déclin du Stade Poméranien ou bien dans des oscillations froides du Tardiglaciaire.

Dans le Bassin de Płock les conditions favorisant le développement des cryoturbations ne pouvaient se réaliser que localement aux temps de la formation des dunes. Il est probable que des blocs de glace morte et de glace hivernale, enfouis peu profondément et conservant de nombreux lacs et dépressions du genre de cuvettes de fusion, pouvaient y exercer une locale influence refroidissante.

Les cryoturbations ont été divisées en deux groupes: (a) fentes, (b) formes solifluidales.

La présence des fentes été constatée dans quatre coupes aux versants au vent, dans du sable stratifié aux pendages minimes. Il s'agit des formes atypiques. On devrait plutôt dire — des formes rappelant les fentes de gel. Leurs parois, en général, ne sont pas parallèles l'une à l'autre. Il y a des élargissements et des rétrécissements. Les fentes, ouvertes vers le haut, se renferment en bas par un arc doux, parfois en coin. La longueur varie de 5 à 20 cm, la largeur — de 1 à 2 cm. Dans leur voisinage les sables stratifiés conservent leur stratification primitive, presque horizontale. Tous ces caractères s'observent dans la dune à Ludwików (photo 4). Le sable stratifié, relativement grossier, est ici traversé par des fentes remplies de sable fin amorphe. Les structures observées dans la dune de Goren Duży ont le caractère pareil.

Dans les deux autres coupes le sable constituant les dunes — très fin et bien classé — révèle des strates douces peu distinctes. Les structures y développées, un peu moindres que précédemment, ne diffèrent du voisinage que par une teinte plus claire, le remplissage sableux ne révélant pas de différences notables quant à la structure et texture par rapport au matériel voisin.

Par leur forme ces structures rappellent celles décrites en Hollande, dites batons ou doigts (*finger shaped outgrowths* — G. C. Maarleveld, C. H. Edelman, 1958). Dans les sables éoliens

de couverture des Pays Bas elles accompagnent un horizon stratigraphique déterminé, attribué à l'Alleröd. Dans le Bassin de Płock on n'a pas trouvé de typiques „doigts” avec leur structure annulaire caractéristique, remplis par du sable humifère avec des débris de charbon de bois. On les a pourtant constatés sur le champ dunaire de la Forêt de Kampinos (information verbale).

Formes solifluidales peuvent être imperceptibles dans les dunes à cause de l'homogénéité et de la couleur identiques des sables les constituant. Les dunes dans lesquelles on a constaté les déplacements locaux de couches par rapport à leur position primitive parallèle, se caractérisent par une nette hétérogénéité granulométrique des couches particulières ou bien par des alternances de strates de sable ferrugineux. Les structures solifluidales ont été observées surtout aux versants au vent où les pendages des strates dépassent rarement 10° .

Dans des coupes successives on peut observer l'avancée variable des processus solifluidaux. Dans la majorité des cas ce sont des formes initiales, dues au „plissement” du versant où les strates ondulées, sans avoir perdu leur continuité, forment des bosses. De telles formes ont été observées entre autres au front de la dune

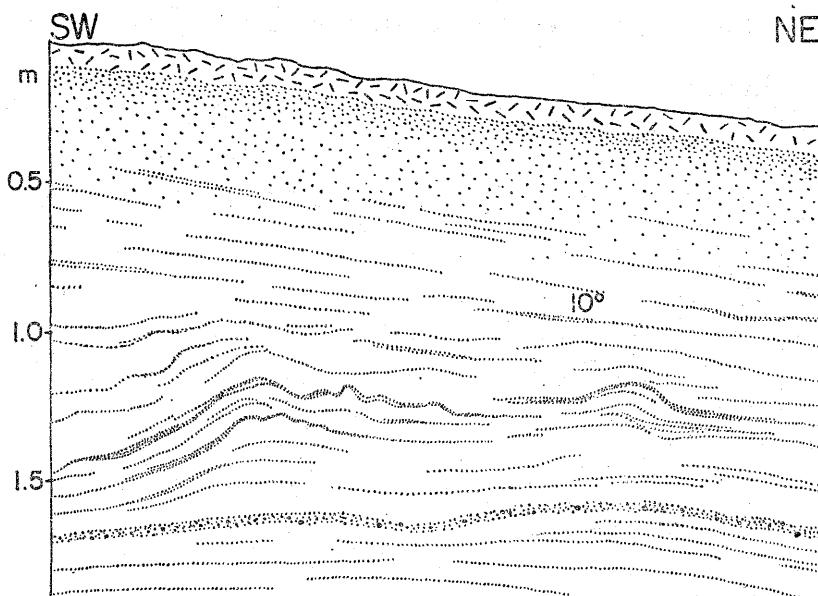


Fig. 10. Structures solifluidales au front de la dune parabolique à Wola Łacka

parabolique à Wola Łącka (fig. 10). La perceptibilité des structures est ici augmentée par des strates jaunes du sable légèrement ferrugineux.

Les structures solifluidales observées dans du sable dunaire stratifié de façon distincte, où les couches successives diffèrent nettement par leur granulométrie, ont un caractère différent. On les a observées entre autres dans une coupe dans la dune située 3 km vers le sud de Duninów Nowy. La dune est ici constituée par des sables stratifiés grossiers, moyens et limoneux. Le degré de perturbation des couches particulières est variable, autant plus fort que le matériel est plus fin. Les structures y observées se sont manifestées probablement par la suite de l'activité peu avancée de la solifluxion en lame, où les couches de sable limoneux étaient le plus mobiles et ont subi les plus fortes déformations. Le sable grossier, par contre, plus sec, était moins mobile et resté presque inchangé.

Les formes de la solifluxion avancée, en rouleau, sont rares dans du matériel dunaire homogène. On les a constatées dans deux dunes. Une de ces coupes est représentée sur la photo 5.

Aux faces sous le vent on n'observe d'habitude pas d'irrégularités dans la forme des strates. Parfois, à l'intérieur du sable dunaire homogène, il y a des couches de sable soit grossier, soit plus

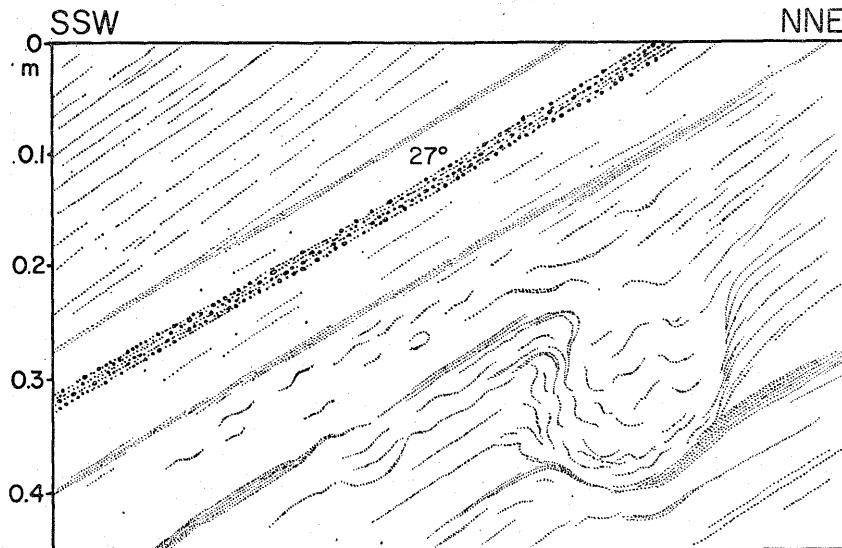


Fig. 11. Structure en poche sur la face sous le vent du cordon dunaire à Goren Duży

fin, de 2 à 15 cm d'épaisseur, révélant soit des rétrécissements et des gonflements, soit de faibles ondulations.

Ce qui mérite une attention particulière c'est une cryoturbation en forme de poche observée à la face sous le vent de la dune de Goren Duzy (fig. 11). Une forme relativement distincte résulte de la participation de fines strates de sable limoneux un peu plus foncées. Les strates limoneuses — ondulées, déchirées et effilochées — ont subi ici aussi la plus forte déformation. Au sommet des sables stratifiés de cette dune, à la stratification peu nette, la ferruginisation agissant de façon sélective a dégagé la structure en poche (photo 6).

PETITES FAILLES ET CHANGEMENTS DES PENDAGES
dans les dunes, liés à la fusion des blocs de glace morte ou hivernale,
reposant sous les dunes ou dans leur voisinage immédiat

Les dunes du Bassin de Płock sont accompagnées par de très nombreuses dépressions fermées, une sorte de cuvettes de fusion, de dimensions variées. Le rapport de la formation des dunes au processus de la fusion de la glace morte avait réveillé l'intérêt de plusieurs chercheurs dont les conclusions ne concordent pas toujours. Dans la présente note nous nous bornerons à remarquer des déformations de la stratification dunaire dues à la fusion de la glace morte. Une telle genèse des structures que nous allons décrire semble indubitable si l'on tient compte du fait qu'elles accompagnent exclusivement des formes de fusion et, en plus, on ne les observe qu'aux versants dunaires avoisinant directement des cuvettes de fusion. Un rôle sans doute important y jouaient de telles caractères que la puissance de la glace morte reposant sous la dune

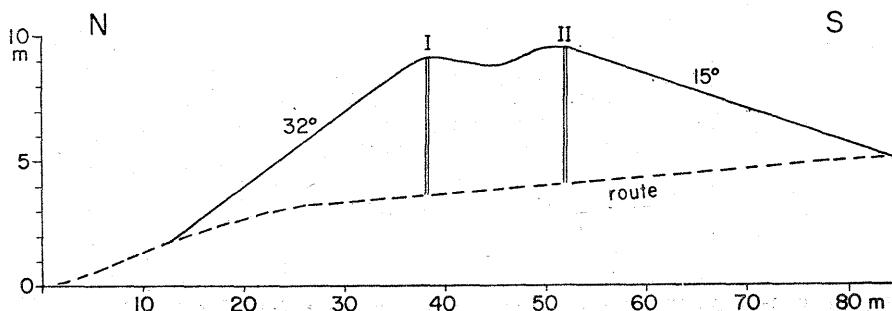


Fig. 12. Coupe transversale de la dune située à l'est de Jezioro Wójtowskie

la forme du bloc et son extension. Au cas où le bloc de glace morte avait l'épaisseur identique au-dessous de la dune entière la structure dunaire a pu ne pas subir la moindre déformation. Le caractère de la déformation était sans doute différent quand le bloc de glace morte terminait en coin ou par une extensive paroi verticale.

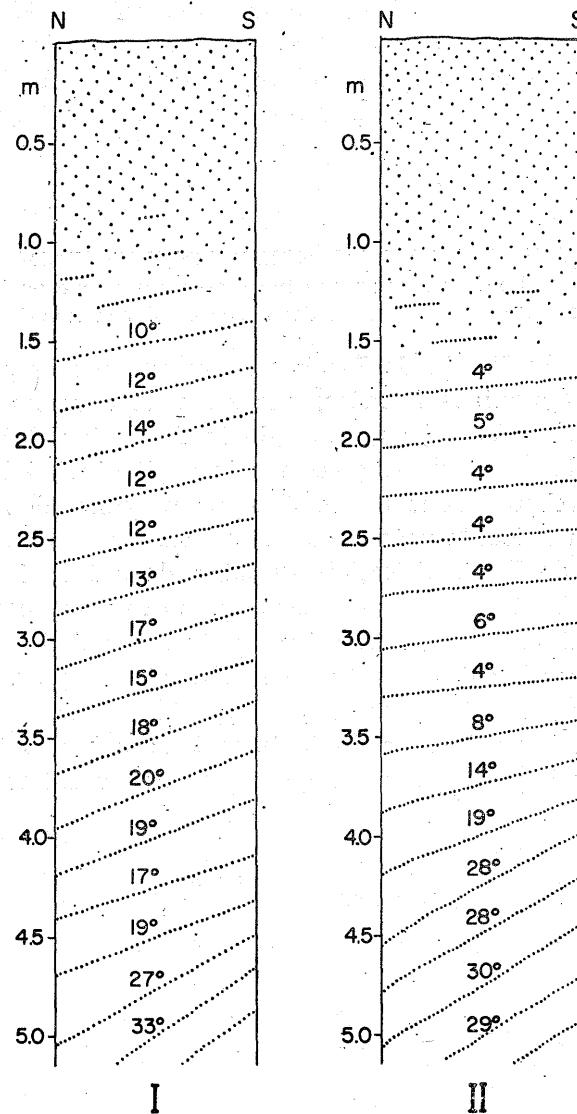


Fig. 13. Schème de l'inclinaison des strates de sable dans les coupes I et II dans la dune située à l'est de Jezioro Wójtowskie



Photo. 1. Structures marmorisées (b) développées à la limite entre le sable amorphe (a) et stratifié (c) dans la dune à Ludwików



Photo 2. Taches et pénétrations le long des racines développées dans du sable stratifié de la dune à Warzachewka

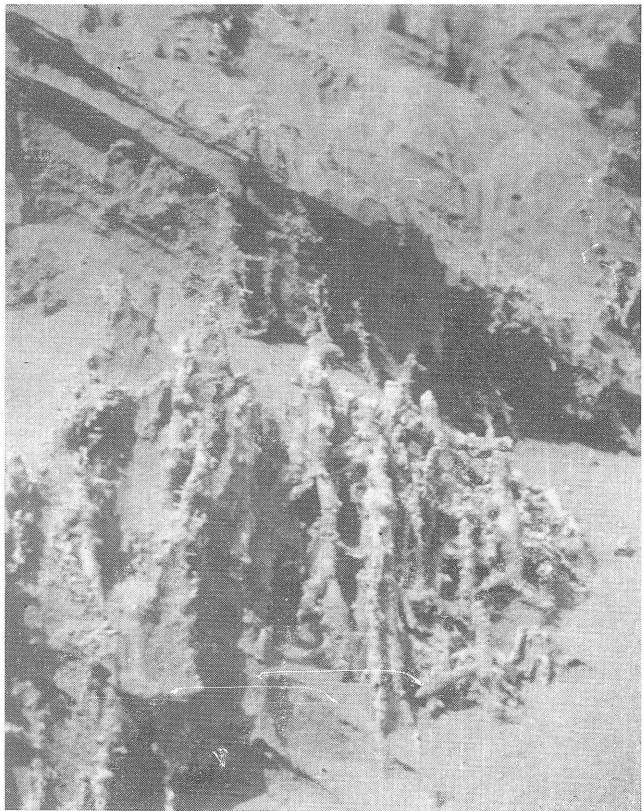


Photo 3. Système de racines calcifiées du pin dans du sable stratifié de la dune à Warzachewka

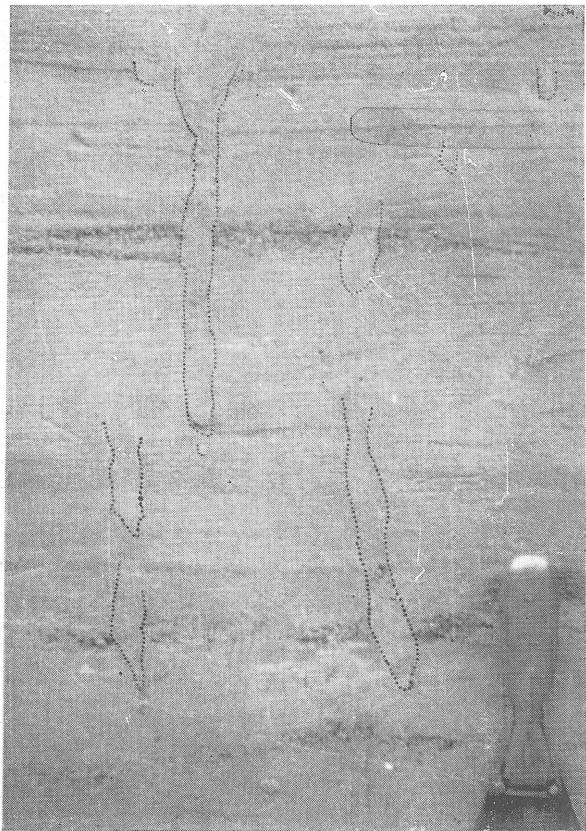


Photo 4. Fentes dans la dune à Ludwików



Photo 5. Structures solifluidales dans la dune à Sędeń

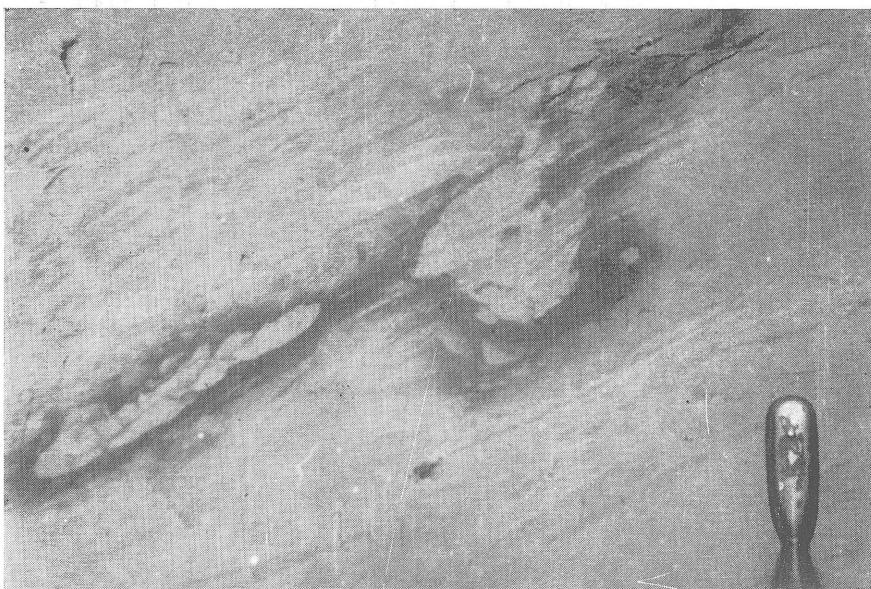


Photo 6. Structure développée par la suite du processus de ferruginisation.
Face sous le vent du cordon dunaire à Górefi Duży

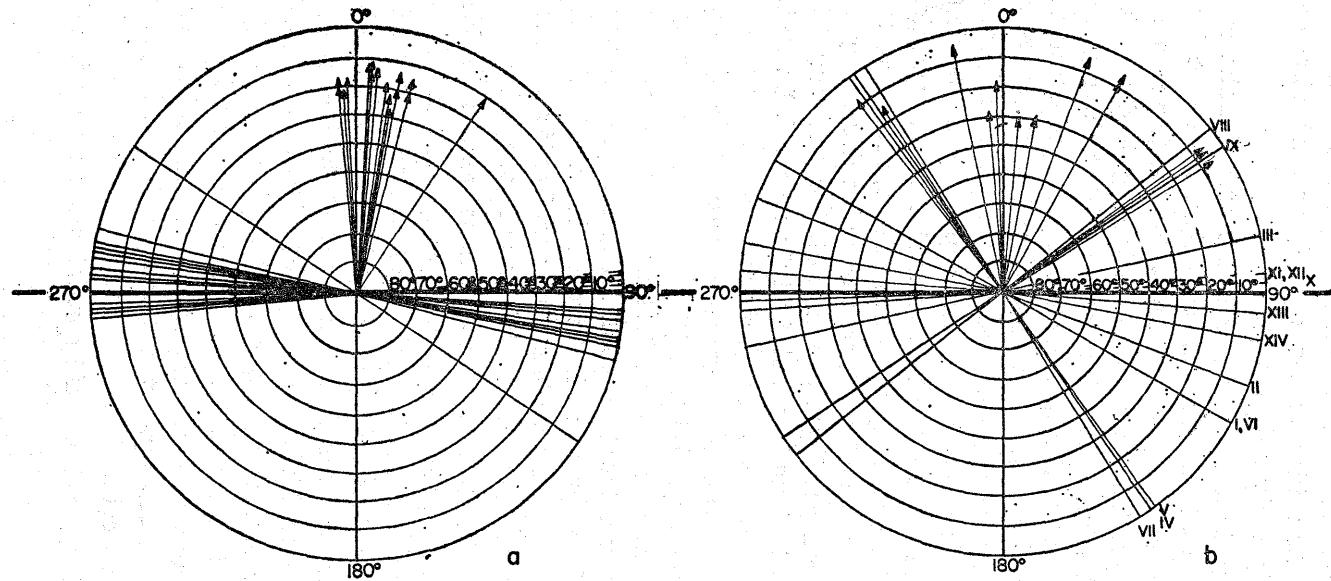


Fig. 14. Diagrammes des directions des strates et des pendages dans les coupes I (a) et II (b) dans la dune située à l'est de Jezioro Wójtowskie

Les structures dues à la fusion de la glace morte ont été décrites sur l'exemple de trois dunes. Il s'agit des cordons parallèles, asymétriques aux raides versants nord, passant directement aux versants des dépressions de fusion.

Aux environs de Jez. Wójtowskie le champ dunaire avoisine, au nord, avec une vaste dépression de fusion. La coupe transversale d'une des dunes est représentée sur la fig. 12. Les mesures des directions et des pendages ont été faites le long de deux coupes marquées sur le dessin. Toutes les deux révèlent du matériel pareil, relativement grossier. Il s'agit des sables amorphes, poudreux, avec de nombreuses granules. Les sables amorphes passent progressivement au sable fin et moyen, avec un peu de sable grosier, nettement stratifié. Dans toutes les deux coupes le sable devient de plus en plus fin vers le bas. C'est le caractère de la stratification des deux dunes qui est remarquable. Les strates, représentées de la façon schématique sur la fig. 13, sont dans les deux coupes inclinées vers le nord. Leur pendages pourtant diffèrent les unes des autres. Ils sont plus forts dans la coupe I située au nord. La stratification, qui diffère de la normale stratification dunaire, n'est pas parallèle. Les pendages des couches augmentent vers le bas, la plus forte différence en pendages existant à la base de deux coupes. Les strates ne sont non plus parallèles. Certaines parmi elles se rétrécissent vers le sud ou terminent en coin. La différence des pendages des strates, entre le sommet et la base de la coupe, atteint 25° . Les directions et les pendages réels sont représentés sur les diagrammes: fig. 14a pour la coupe I et 14b pour la coupe II.

Le genre de la stratification que nous venons de décrire n'est pas caractéristique pour les dunes ni pour les faces au vent ni sous le vent. L'accumulation du sable avait dû se passer ici sous des conditions particulières. La partie nord de la dune avait été accumulée probablement sur de la glace morte dont la puissance augmentait vers le nord où, à présent, il y a une vaste dépression de fusion. Au fur et à mesure que la glace fondait une partie de la dune subissait tassement. Le processus a dû être ininterrompu et lent, car les couches n'ont pas perdu leur continuité. Les pendages plus faibles dans la coupe sud témoignent que la glace morte y avait terminé en coin.

Une situation pareille a été constatée sur un cordon dunaire au voisinage de Leśn. Smolarskie. Du côté nord de la dune il y a des dépressions de fusion. En coupe transversale (fig. 15) on remarque

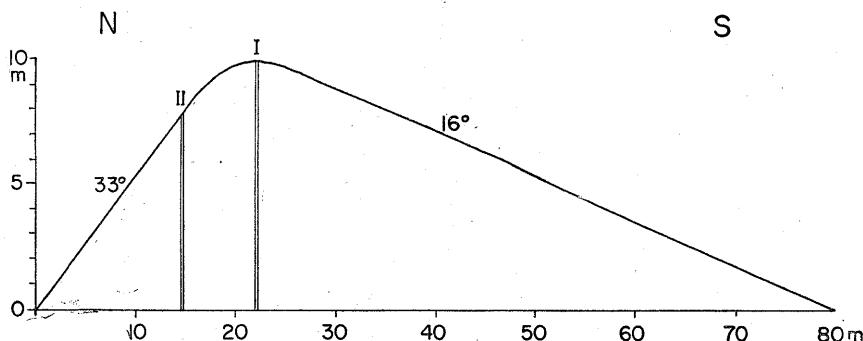


Fig. 15. Coupe transversale de la dune située au nord de Leśn. Smolarskie

une nette asymétrie de la dune qui n'est pas due pourtant à une accumulation éolienne spéciale. Les mesures structurales, faites le long de deux profils marqués sur la figure, révèlent des pendages assez forts, dirigés vers le sud, ce qui nous permet de supposer qu'il ne reste ici que la face sous le vent — constituant aujourd'hui le versant sud de la dune, plus doux. La pente forte du côté nord cessera d'être énigmatique si, après une analyse détaillée de la structure dunaire interne dans les deux coupes, on aura procédé au même raisonnement que tout à l'heure. Ici aussi une partie de la dune a dû être accumulée sur de la glace morte. Cela résulte des différences considérables entre la structure du sommet de la dune et celle du versant nord. Au premier cas il n'y a pas de perturbations dans la stratification du tout. La stratification est ici presque exactement parallèle (fig 16a). Dans la coupe II par contre, dans la masse du sable à stratification parallèle (pendages des strates vers le sud — moins forts qu'au sommet de la dune — vers 20°) il y a des séries de sable caractérisé par des directions des strates et des pendages variables. Les directions et pendages réels des couches ainsi que les directions et pendages des strates sont représentés sur la fig. 16b.

Un autre exemple de la déformation de la stratification dunaire a été constaté à Krzywy Kołek où un cordon dunaire parallèle, borne, du côté nord, la vallée de la Skrwa. La vallée profite ici d'un ancien chenal sous-glaciaire, dégagé après la fusion de la glace morte qui l'avait préservé. Ici aussi le versant raide nord de la dune ne constitue pas la face sous le vent. Ceci est attesté par les mesures structurales faites le long de deux profils. Dans toutes les deux coupes les strates sont inclinées vers le SE sous l'angle de 30°.

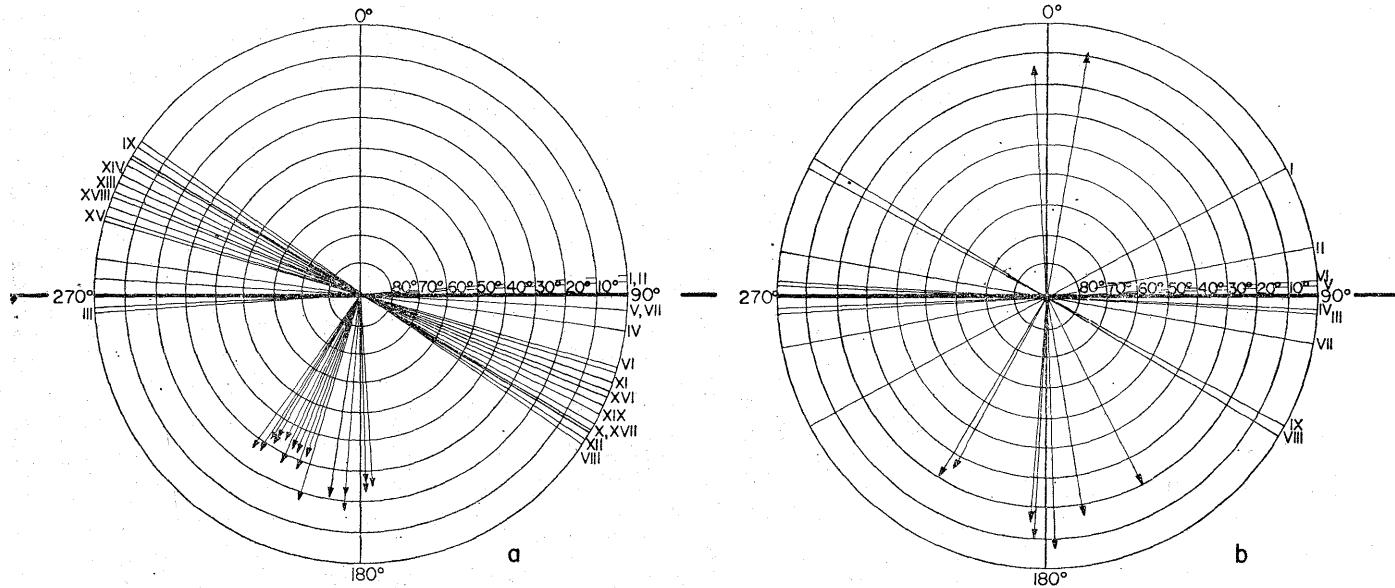


Fig. 16. Diagrammes des directions des strates et des pendages dans les coupes I (a) et II (b) dans la dune située au nord de Leśn. Smolarskie

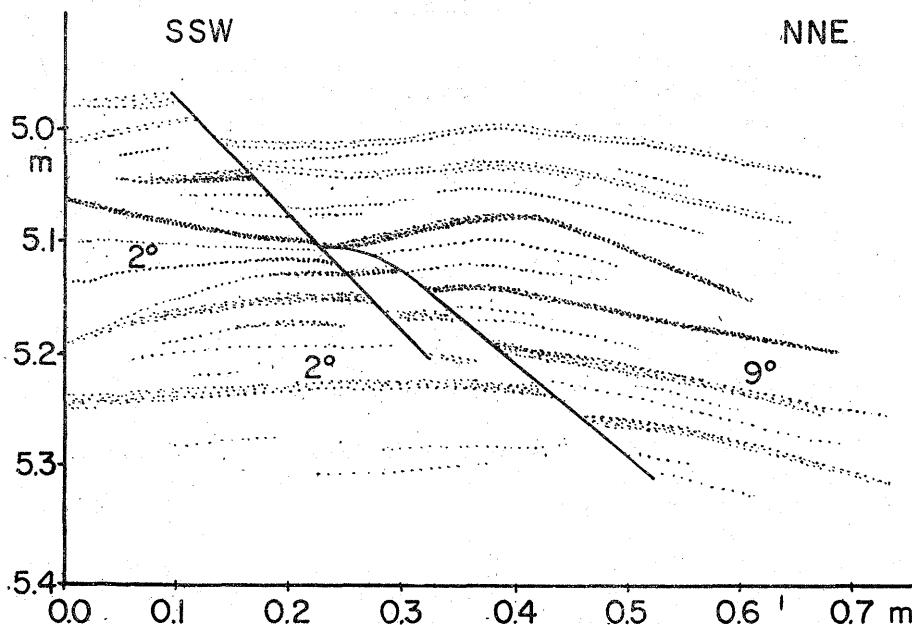


Fig. 17. Failles et fractures dans la dune à Krzywy Kołek

Par conséquent, le versant actuel nord n'est pas la face sous le vent, de même que dans la dune décrite tout à l'heure. La forme raide du versant nord est un phénomène secondaire, dû au tassement de cette partie de la dune, provoqué par la fusion de la glace morte remplissant le chenal et gisant, en partie, sous la dune-même. Les pendages très forts de certaines couches (jusqu'à 44°) mesurés dans la coupe I parlent en faveur de la même conclusion. Une autre preuve du tassement de la partie nord constituent de petites failles (fig. 17) observées aussi dans la coupe I. Une forte perturbation de la stratification, jusqu'au déchirement des lits, indique que la puissance du bloc de glace morte avait été considérable.

Tenant compte de tous ces faits nous tâcherons de relever le problème du rapport des actions éoliennes au processus de la fusion de la glace morte. Les perturbations observées, ainsi que leur position et extension, nous semblent indiquer soit que l'activité éolienne précédait la fusion de la glace morte, soit que ces deux processus s'enchaînaient.

Bibliographie

- Berquist, St. G., 1935 — The Grand Sable Dunes on Lake Superior, Alger County, Michigan. *Pap. Michigan Act. Arts, Lett.*, 21.
- Drzewicka, I., 1953 — Sprawozdanie z prac terenowych wykonanych w miesiącu wrześniu 1953 na arkuszu Dobrzyków 1:25 000 (Comptrendu des recherches de terrain menées en septembre 1953 sur la feuille Dobrzyków de la carte au 1:25 000). Archives de l'Institut Géologique, Varsovie.
- Galon, R. 1959 — New investigations of inland dunes in Poland. *Przegl. Geogr.*, t. 31.
- Jahn, A., 1951 — Zjawiska krioturbacyjne współczesnej i plejstoceńskiej strefy peryglacialnej (summary: Cryoturbate phenomena of the contemporary and of the Pleistocene periglacial zone). *Acta Geol. Polonica*, vol. 2.
- Kobendzina, J., 1961 — Niektóre zjawiska towarzyszące procesom eolicznym na wydmach Puszczy Kampinoskiej (summary: Some phenomena accompanying eolian processes on dunes in the Kampinos Forest). *Przegl. Geogr.*, t. 33.
- Krygowski, B., 1961 — Geografia fizyczna Niziny Wielkopolskiej, cz. I. Geomorfologia (Géographie physique de la Plaine de Grande Pologne. Première partie: Géomorphologie). Poznań.
- Maarleveld, G. C., 1964 — Periglacial phenomena in the Netherlands during different parts of the Würm time. *Bulletyn Peryglacialny*, no. 14.
- Maarleveld, G. C., Edelman, C. H., 1958 — Pleistozän-geologische Ergebnisse der Bodenkartierung in den Niederlanden. *Geol. Jhrb.*, t. 73.
- Poser, H., 1948 — Äolische Ablagerungen und Klima des Spätglazials in Mittel- und Westeuropa. *Die Naturwissenschaften*.
- Stankowski, W., 1963 — Rzeźba eoliczna Polski północno-zachodniej na podstawie wybranych obszarów (Le relief éolien de la Pologne du NW sur l'exemple des territoires choisis). *Prace Komisji Geogr.-Geol. T.P.N.*, t. 4; Poznań.
- Urbaniak, U., 1962 — Struktura wydmy w Goreniu Dużym (summary: The structure of a dune in Goren Duży). *Przegl. Geogr.*, t. 34.