

Anna Dylikowa

Łódź

LE PROBLÈME DES DUNES INTÉRIEURES EN POLOGNE À LA LUMIÈRE DES ÉTUDES DE STRUCTURE

Abstract

In the recent problematics of dunes, two groups of questions may be distinguished: 1° dynamics of dune-forming processes, and 2° zonal distribution of dunes showing similar pattern both in their morphology and structure.

Within the first group the following problems are discussed: origin and age of the direct substratum of dunes, their structure and texture, phases of dune development as well as the position of longitudinal, transversal and parabolic forms in evolutionary cycle of the dune relief. The stone pavement containing eolgyptoliths underlying the dunes in the Łódź region was most probably formed at the beginning of the waning phase of the Würm. The analytical studies of the dune structure and texture permitted to recognize three and even four (at Katarzynów near Łódź) dune covers commonly occurring in Middle Poland as well as to determine the changes of wind directions and activity during the accumulation of each of dune covers. Identification of soil horizons of Bölling, Alleröd and Boreal age, corresponding to the periods of stabilisation of eolian processes as well as the palynological data afforded the possibility to reconstruct the course of dune formation and infer the existence of three or — under favourable conditions — even four phases of the dune development. Both the palynological data and C¹⁴ dating prove that these phases were connected with the Oldest, Older and Younger Dryas and with the Holocene (after the Boreal time). However, in the present-day state of investigations it is still difficult to ascertain whether the changes in wind directions caused the regularity in the transformation of one kind of dune forms into another. The transversal and longitudinal dunes seem to appear both as an initial forms of parabolic dunes and as the forms testifying their decline.

The problem of zonal distribution of the dune land-forms cannot be resolved unless it is first stated whether the dunes originated simultaneously or not in the whole area of Poland. In the light of the investigations so far carried on, the dunes in the Szczecin Basin are probably the youngest. As to the other areas lying within the extent of the older Würmian phases as well as of the Riss and Mindel glaciations the final conclusions cannot be drawn yet. The dunes occurring within larger valleys and basins show a differentiation in shapes due to their vertical situations. The nature of this phenomenon so far is unknown but from among the controlling factors there should be mentioned such as differences in age and influence of local, mainly topographic and hydrographic conditions.

Le progrès en études des dunes continentales intérieures en Pologne* acquis durant les 10 dernières années est dû à une collaboration très étroite des géomorphologues, des archéologues et des paléobotanistes et, ces derniers temps, même des pédologues. C'est grâce à cette union d'efforts de nombreux savants que la résolution

de nombreuses questions fondamentales est maintenant ébauchée, concernant la stratigraphie, par conséquent donc la chronologie des dunes, dans les régions soumises à des études détaillées. Certaines des hypothèses avancées nous semblent actuellement convaincantes. D'autres demandent de la consolidation et de la vérification par des faits nouveaux. En plus, les recherches détaillées, où la méthode de l'analyse de structure, appliquée déjà à l'étude des dépôts glaciaires (Dylíkowa, 1952) est de plus en plus généralement employée, ont fait surgir des problèmes nouveaux, la question de paléosols par exemple (Kozarski, Tobolski, 1963; Wojtanowicz, 1965; Manikowska, 1966) complètement inaperçue par les travaux plus anciens consacrés aux dunes.

Dans la recherche dunaire en Pologne il y a deux groupes principaux de questions. C'est l'analyse de structure dont le rôle est essentiel en ce qu'elle permet de poser ces questions, sinon de les résoudre. Le premier d'eux concerne le dynamisme des actions éoliennes au Tardiglaciaire et à l'Holocène. Dans le second entrent les problèmes de zonalité en répartition des dunes à des traits morphologiques et structuraux pareils. Si l'on fait la revue des progrès accomplis ces 10 dernières années dans le domaine de deux groupes de questions que nous venons de mentionner, il faut relever, entre autres, les problèmes dont la connaissance doit être approfondie dans les années à venir.

LE DYNAMISME DES ACTIONS ÉOLIENNES

Les études du dynamisme de la formation des dunes nous mènent à une conception paléogéographique synthétique, appuyée sur une reconstruction autant complète que possible des traits principaux du milieu dans lequel les dunes se sont formées. L'importance particulière revient ici à des reconstructions des oscillations de climat et des changements du tapis végétal et du sol.

Les études des dunes intérieures en Pologne, menées jusqu'à ces jours, permettent de dégager plusieurs problèmes essentiels que nous allons discuter.

LE SUBSTRAT DES DUNES

La détermination de la limite chronologique inférieure des dunes demande un déchiffrement de la genèse et une définition de l'âge préalables du matériel qui constitue le substrat immédiat sur lequel

l'accumulation des sables éoliens s'est manifestée. La détermination de l'origine du substrat doit être basée sur ses traits structuraux et texturaux qui permettraient d'établir plus en détail les conditions du milieu aux temps précédant l'accumulation du sable éolien. Les études dunaires cependant, menées d'habitude „de haut” n'arrivent pas toujours jusqu'au substrat-même. Les forages — en plusieurs cas la seule méthode qui permet de révéler le substrat — fournissent presque uniquement des informations lithologiques, insuffisantes d'habitude à la détermination de sa genèse, aux régions envahies par la glaciation Cracovienne et celle de la Pologne Centrale surtout. De telles notions que *matériel glaciaire* ou *matériel fluvio-glaciaire*, même *argile à blocaux* ou *sables* et *graviers* s'avèrent imprécises à l'étape actuelle de nos connaissances du Pléistocène. Elles peuvent mener à la conclusion que l'accumulation des sables éoliens a commencé immédiatement après le recul des poussées stadias respectives de la calotte glaciaire.

A titre d'exemple, je vais me servir du profil de Katarzynów décrit à une autre occasion déjà (Dylikowa, 1961a, b, 1964). Les conditions locales, exceptionnellement favorables, dans une petite vallée sèche, dans laquelle il y a des dunes, nous ont rendu possible d'effectuer une analyse relativement précise des caractères de leur substrat. Les forages atteignant le substrat des dunes ont permis de révéler un matériel situé sous le cailloutis qui d'après ses seuls traits lithologiques aurait dû être défini comme de l'argile morainique — une argile du stade de la Warta. En ce cas-là le Würm ne serait représenté que par le cailloutis à des cailloux façonnés par le vent et par les sables dunaires qui le recouvrent. Un certain nombre de puits profonds (3 à 6 m) pourtant a révélé qu'au-dessous de l'argile il y a, entre autres, un profil du sol éémien très bien développé (Manikowska, 1966). L'argile constitue donc un dépôt remanié, au cours du Würm, par des processus de congélifluxion. Cette dernière conclusion est d'ailleurs confirmée par une texture nettement fluidale de la série, ce que l'on peut observer dans les puits.

Les observations détaillées ultérieures ont permis de tirer plusieurs conclusions menant à la reconstruction du milieu climatique durant la période qui avait précédé l'accumulation des sables dunaires. On a constaté que toute la série de dépôts — le cailloutis avec l'argile à blocaux lui superposée et les sables immédiatement inférieurs, portent des traces nettes des perturbations provoquées par l'action de la pression congélistatique et du gonflement de gel qui s'est manifestée après la déposition de l'argile (Dylikowa,

1961a). Le profil du substrat des dunes de Katarzynów nous fournit donc tout un nombre d'informations quant à l'influence du milieu périglaciaire durant la période qui avait précédé l'accumulation du sable éolien. On y a réussi de distinguer les 3 phases du Würm: la phase de croissance, la phase de climax et la phase de décroissance. L'existence de ces 3 phases est confirmée par plusieurs faits observés dans d'autres localités de la région de Łódź (Dylik, 1967).

Les conditions d'un climat frais et humide de la phase de croissance sont représentées par l'accumulation des sables, des limons et des graviers, situés au-dessous de l'argile elle-même et, enfin, par les perturbations provoquées par la pression congélistatique, situées à la limite entre l'argile à blocs et la série inférieure. C'est à l'intérieur de cette série-ci qu'il y a eu probablement le sommet du pergélisol, situé vers 0,5 à 1,0 m à partir du bas de la série ou bien à la profondeur de 1 à 2 m à partir du sommet de la série inférieure, ce qui est indiqué par l'absence de toute perturbation de la structure du matériel situé plus bas.

Un climat froid et sec de la phase de climax s'est marqué, à Katarzynów, par des processus du façonnement des cailloux par le vent. C'est la même phase à laquelle correspondent les polygones des fentes de gel au remplissage par la glace, connus dans d'autres localités (Dylik, 1967). Il s'agissait donc d'une phase dans laquelle le sommet du pergélisol était situé tout près de la surface du sol.

Le commencement de la phase de décroissance s'est marqué par le retour du climat un peu plus doux — d'un climat subarctique humide — pendant lequel le sommet du pergélisol a de nouveau baissé. Les cailloux façonnés précédemment par le vent et d'autres éololyptolithes, de même que les cailloux frais, lavés directement du matériel morainique aux collines voisines par la suite d'une vive action du ruissellement, se sont éparpillés à la surface de l'argile à blocs en forme d'un cailloutis continu. C'est au-dessus du cailloutis que la première couverture éolienne a commencé de s'accumuler au cours du Dryas inférieur. Elle renferme pourtant des intercalations de gravier à structure qui indique une intervention périodique des eaux courantes. C'est à la même période probablement que la seconde série de perturbations se développe, située cette fois-ci à la limite entre le sommet de l'argile, avec le cailloutis, et la série inférieure de la couverture éolienne. Ces perturbations-ci, embrassant une zone considérablement moins profonde, sont attribuées à l'action de la pression de gel, la plus forte dans l'argile à blocs (Dylikowa, 1961a).

La partie décrite du profil de Katarzynów nous rend possible d'étudier les événements qui ont eu lieu dans la vallée sèche au cours du Würm entier, à partir de l'Interglaciaire Éemien, jusqu'au début de la phase de décroissance du Würm — donc jusqu'à la phase dans laquelle le cailloutis avec les éologlyptolithes s'est déposé, c'est-à-dire précédant immédiatement le Dryas inférieur. C'est à partir du Dryas inférieur que l'activité éolienne a commencé ici. On va la discuter plus en détail dans un des chapitres suivants.

Dans les travaux consacrés aux dunes intérieures de la Pologne on trouve de plus en plus souvent des considérations concernant non seulement les caractères lithologiques du substrat des sables éoliens. On s'occupe aussi parfois de son origine.

Gawlik (1969), au cours de ses études menées dans le Bassin de Szczerców, constate que le substrat des dunes est constitué soit par des sables fluviatiles, soit par de l'argile à cailloux façonnés par le vent. Il est probable qu'il y s'agit, de même qu'à Katarzynów, d'une argile morainique remaniée par la congélifluxion. Dans le Bassin de Szczerców, le processus n'a dû agir qu'après la phase de climax du Würm. Ce sont les cailloux façonnés par le vent, dont l'origine est liée à cette phase-là précisément, qui en témoignent. Le retard de l'action de la congélifluxion par rapport à Katarzynów pourrait-être expliqué par la différence en humidité entre les deux régions. Dans le Bassin de Szczerców il y avait eu un lac de barrage dont les eaux se maintenaient pendant le temps relativement long. Aujourd'hui encore c'est une région à nappe phréatique très peu profonde. A Katarzynów par contre, le niveau d'eau avait dû baisser considérablement plus tôt. Il se trouve actuellement à la profondeur de 5 à 6 m environ. S'il s'agit de l'âge des sables fluviatiles situés au-dessous des dunes du Bassin de Szczerców nous n'en savons encore rien de précis.

Dans les travaux consacrés aux problèmes dunaires des régions de la Glaciation Baltique publiés ces derniers temps (Urbaniak, 1967; Nowaczyk, 1967) on s'occupe aussi un peu du caractère du substrat dunaire.

Urbaniak, tout en analysant la répartition, les caractères morphologiques et la structure des dunes du Bassin de Płock s'occupe aussi du rapport des dunes au relief plus ancien, pré-éolien, c'est-à-dire de leur rapport aux terrasses de la Vistule et aux champs et cordons de kames situés dans la partie est du Bassin. Les dunes s'observent sur toutes les terrasses, tandis que parmi les kames elles sont collées souvent aux flancs de collines respectives. L'âge des ter-

rasses, la terrasse holocène — la plus jeune — mise à part, n'est pas encore déterminé. Malheureusement, l'auteur n'a pas porté une attention plus particulière aux traits caractéristiques détaillés du matériel constituant le substrat dunaire, dans l'horizon dit de Ciechomice (éémien?) et sur la terrasse d'accumulation, haute, et sur la terrasse d'accumulation-érosion, basse, surtout, où, entre autres, elle a constaté la présence d'un cailloutis.

Nowaczyk, en décrivant la situation géologique des sables éoliens de Gorzewo, aux environs de Wągrowiec, mentionne une „argile morainique baltique”, recouverte d'un horizon à éologlyptolithes, dans leur substrat. Il s'agit, probablement, de l'argile morainique de la phase de Poznań de la Glaciation Baltique; on ne sait pas pourtant si elle ne porte pas accidentellement des traces de perturbations périglaciaires qui pourraient soit précéder, soit venir immédiatement après la phase de l'éolisation des cailloux. Il est possible que la phase du façonnement éolien des cailloux est à lier avec la phase de Poméranie, ou bien avec le Dryas inférieur. Le problème n'a pourtant pas été résolu. S'appuyant sur des analyses palynologiques, l'auteur ne met en rapport l'accumulation des sables sommitaux, reposant directement sur les éologlyptolithes, qu'avec le Dryas moyen. Il reste donc à expliquer une lacune stratigraphique entre la phase de l'accumulation de l'argile à blocs et l'épisode où les éologlyptolithes ont été façonnés d'une part et le commencement de la déposition des sables éoliens de l'autre.

Sur le champ dunaire entre Przysieczyn et Ruda Koźlanka, au-dessous des sables éoliens, Nowaczyk a découvert des dépôts organiques. L'analyse palynologique précise l'âge subboréal pour leur sommet. Les sables éoliens seraient donc d'âge Atlantique. En ce cas-ci le problème de l'âge du substrat avait été résolu d'une façon unéquivoque, ce qui a aidé également à déterminer l'âge des dunes.

Le problème d'origine et d'âge du substrat dunaire n'a été résolu, voire esquissé en quelque détail, qu'en quelques points. Il faut les considérer donc comme appartenant à des questions toujours ouvertes dont il vaut la peine de s'occuper, dans les régions envahies par les glaciations plus anciennes surtout, peut-être aussi sur les terrains occupés par les phases plus anciennes de la Glaciation Baltique. Les recherches ultérieures apporteront, peut-être, la réponse à la question si le profil du substrat dunaire de Katarzynów peut être considéré comme représentatif pour tout le territoire interfluvial appartenant au domaine du Stade de la Warta. Il faut remarquer que la comparaison de ce profil avec les résultats des études menées aux Pays Bas

parlent en faveur d'une telle hypothèse (Van der Hammen, Maarleveld, Vogel, Zagwijn, 1967).

LA STRUCTURE ET LA TEXTURE DES DUNES

Ce qui est frappant dans les travaux dunaires plus anciens c'est un intérêt particulier porté aux caractères morphologiques des dunes sur lesquelles toutes les conclusions concernant les directions des vents avaient été fondées. Małkowski a été le premier à énoncer la supposition qu'il avait eu non seulement des vents venant du secteur ouest, mais encore du sud, qui façonnaient les dunes polonaises (Małkowski, 1912, 1917; Lenciewicz, 1922; Enquist, 1932). C'était probablement Lenciewicz (1922) qui, pour la première fois a attiré attention sur l'hétérogénéité de la structure dunaire interne. Dans une coupe de 4 m de profondeur, traversant une dune dans la Forêt de Kampinos il a constaté la structure bipartite. Le série inférieure y possédait la stratification indiquant des vents ouest et nord-ouest pendant la formation des dunes. Lenciewicz ne s'est pas prononcé au sujet des caractères structuraux de la série supérieure. Il mentionne pourtant l'existence d'un lit d'humus de 0,5 cm d'épaisseur, séparant les deux séries de sable et témoignant d'une „lutte des plantes aux temps de la formation de la dune”. Il s'agissait probablement d'un reste d'un sol correspondant à un échauffement du climat qui terminait la première phase d'évolution dunaire.

Les premiers essais de la méthode de l'analyse de structure dans les études dunaires avaient eu lieu au commencement de la dernière décennie (Dylikowa, 1958). Comme le premier on a avancé alors le problème d'une analyse détaillée de la structure interne des dunes. On tâchait de déterminer les traits directifs de la stratification et les caractères du matériel dunaire. Les conclusions fondées sur une telle analyse, à cette étape-là de la recherche dunaire, n'avaient pu que posséder un contenu dynamique. A l'époque actuelle la méthode est de plus en plus généralement employée dans ce domaine de géomorphologie (Stankowski, 1963; Urbaniak, 1967; Nowaczyk, 1967; Gawlik, 1969). On observe aussi une tendance à l'enrichir en de nouveaux éléments, ce qui contribue certainement à la connaissance de plus en plus complète et universelle des formes dunaires. Grâce à cette méthode on a accumulé déjà tout un nombre d'observations détaillées sur la structure dunaire et sur les processus qui participent dans leur évolution.

Le point de départ de l'analyse structurale des dunes c'est la morphographie — la description détaillée des caractères extérieurs tels que la forme de la dune en projection horizontale, les hauteurs relatives, l'inclinaison des versants, le discernement des niches de déflation et la détermination de leur position. L'étape très importante de l'étude est la détermination du parcours des axes morphologiques des formes particulières du complexe dunaire analysé. Parfois, quand on a affaire à un groupe de dunes, un tel surtout où, à côté des dunes paraboliques il y a des cordons latéraux et longitudinaux, il est utile de tracer les axes morphologiques primaires, c'est-à-dire correspondant aux formes essentielles, directives, telles que sont les dunes paraboliques, et les axes morphologiques secondaires, se rapportant à d'autres formes dunaires. Enfin, il est nécessaire de dresser une caractéristique morphologique génétique du voisinage direct et de définir les traits caractéristiques de la position des dunes dans l'ensemble des formes.

L'étude de la structure interne mène avant tout à la reconnaissance des caractères du matériel du substratum des dunes et à la détermination de sa genèse, ce que nous venons de discuter dans le chapitre précédent. L'analyse des sables dunaires devrait être basée sur une reconnaissance préalable des unités sédimentaires principales, c'est-à-dire des séries de sable aux pendages et aux caractères lithologiques pareils et au même rythme de sédimentation. Le point important est l'enregistrement de tous niveaux pédologiques ou bien de toutes séries contenant du matériel organique, ce qui nous autorise à délimiter les couvertures éoliennes respectives et, par conséquent, d'établir la séquence et le nombre de phases de formation des dunes. Il arrive parfois, surtout aux versants fossiles qui ont été soumis à une dégradation intense, que ces niveaux sont détruits. A leur place il y a alors de nettes surfaces de discordance qui séparent les unités sédimentaires à des caractères structuraux et texturaux différents.

A la même étape de l'étude il est nécessaire également de tracer et de déterminer les traits essentiels de la structure dunaire de manière autant précise et détaillée que possible, c'est-à-dire les directions des couches, les pendages et les surfaces de contact entre les unités sédimentaires particulières — des niveaux pédologiques et des séries organiques qui tracent souvent les versants fossiles des dunes.

Une unité sédimentaire peut être constituée par exemple par une série de sable à stratification oblique aux pendages dirigés vers la face sous le vent représentant la partie frontale de la dune. Une

unité différente peut être une série de sable aux pendages plus faibles dirigés vers la face au vent et tronquant la série précédente. Le caractère commun de deux unités sont les directions des couches identiques ou pareilles ce qui marque la stabilité de la direction du vent. La variabilité des sens des pendages et de leurs valeurs indique des transformations de la structure de la dune provoquées par son mouvement. Le passage d'une unité à l'autre avait eu lieu cependant en des conditions dynamiques identiques du milieu éolien dominé par une activité du vent relativement libre. Les surfaces de tronquement constatées ne correspondent alors qu'au passage d'une phase de sédimentation à l'autre, c'est-à-dire de la phase de sédimentation „en dunes” à la phase de sédimentation „plate” (Dylikowa, 1952). Les mesures détaillées et précises des directions de couches nous permettent de trouver une valeur moyenne, c'est-à-dire l'axe structural (Dylikowa, 1952) pour toute unité sédimentaire. Les directions de couches et les valeurs des pendages nous permettent de décider si l'on a affaire à la face au vent ou bien à celle sous le vent. En plus, les mesures aussi bien des directions de couches que des pendages nous fournissent de l'information sur la direction du vent pendant l'accumulation de toute série sédimentaire déterminée. L'oeuvre récente de Urbania k (1967) nous apporte tout un nombre d'observations intéressantes concernant les dunes du Bassin de Płock étudiées déjà il y a quelques années par Mojski (1960). Urbania k, en analysant la structure des dunes, y avait distingué des séries distales (face sous le vent), des séries proximales (face au vent) et des séries caractéristiques pour les parties culminantes des dunes ce qui lui a permis de tirer des conclusions quant aux processus de formation et de transformation des dunes sur le territoire étudié. L'auteur s'est occupé également du phénomène de stratification cyclique du matériel dunaire qui se manifeste par un rythme régulier des lits de matériel fin alternant avec du sable grossier, les lits étant de plus en plus minces vers le sommet des coupes. L'auteur interprète ce rythme comme la réflexion des oscillations d'accumulation au cours de l'année, ce qui paraît tout à fait convaincant. Le phénomène pareil a été observé également par Gawlik (1959) dans les dunes du Bassin de Szczer-ców.

Les niveaux de sols fossiles plus ou moins bien développés, ou leurs traces, et les séries de matériel organique — le phénomène commun dans les dunes — jouent le rôle décisif dans la reconnaissance des couvertures dunaires, c'est-à-dire des séries composées par une ou quelques unités sédimentaires. Ces niveaux reflètent des

changements du milieu — du climat sec et frais à un climat plus humide et plus chaud, favorisant le développement des processus pédogénétiques et de la végétation plus abondante. Mais ce sont les questions auxquelles on va revenir dans le chapitre suivant. Il faudrait rappeler pourtant qu'il est assez fréquent, au cas où le sol ou toute autre trace d'un milieu plus chaud avait été entièrement détruit, d'observer la superposition directe d'une couverture sur l'autre. En ce cas-là seules les mesures des pendages, indiquant un net changement de la direction du vent, démontrent qu'on a affaire à deux couvertures dunaires différentes et non pas à deux simples unités sédimentaires.

La détermination des unités sédimentaires particulières constitue le point de départ à des études de plus en plus minutieuses à l'intérieur de chacune d'elles. Ces études consistent en des analyses granulométriques, pétrographiques et en une étude des traits caractéristiques des grains respectifs comme l'arrondissement ou la transparence. Il faut rappeler que C a i l l e u x et T r i c a r t (1958) y remarquent une certaine régularité consistant en ce que la proportion des grains anguleux augmente au fur et à mesure que leur taille diminue.

Les résultats de l'analyse granulométrique du sable dunaire mènent à la définition de la capacité de transport du vent. Les conclusions concernant la vitesse du vent sont fondées sur des observations comparatives faites sur les conditions actuelles, et sur les calculs prenant en considération les variations des fractions de sable dans les couvertures dunaires respectives. L'auteur de ces pages (1958) a obtenu, par exemple, la valeur de 6 à 8 m/sec. pour la fraction au-dessous de 1 mm, représentant la phase d'accumulation éolienne principale. Tenant compte pourtant d'une proportion considérable de grains grossiers, au-dessus de 1 mm, dans les couvertures dunaires correspondantes à cette phase-là on pourrait admettre la valeur de 10 m/sec., comme la vitesse maximale. Pour la phase dite de transformation la valeur considérablement plus faible a été obtenue — 3 m/sec. environ, tandis que la phase dite de destruction a donné 2,5 à 5 m/sec. P e r n a r o w s k i (1959) a étudié la question de vitesses minimales du vent nécessaires pour que les grains de sable de 1 à 3 mm soient soit roulés à la surface du sol, soit emportés par le vent. Pour les grains de la fraction fondamentale (0,2-0,4 mm — D y l i k o w a, 1958) il a obtenu les valeurs suivantes: 3,5 à 5 m/sec. pour les grains roulés et 5 à 6,7 m/sec. pour les grains emportés par le vent. S t a n k o w s k i (1963) s'est appuyé sur des mesures précises des conditions actuelles du transport éolien concernant les fractions

de 0,1 à 0,5 mm. La vitesse nécessaire à la mise en mouvement des grains secs de 0,1 mm est selon lui égale à 2 m/sec., tandis que pour les grains de 0,5 mm — 4 m/sec. La valeur critique pour la mise en saltation est égale à 4 m/sec. Nowaczyk (1967) admet la valeur générale de 5 à 9 m/sec. pour les dunes des environs de Mieścisko. Maruszczak (1967) évalue la vitesse des vents formant les dunes en Pologne Sud-Est à 5,7 m/sec. Wojtanowicz (1965) admet la vitesse de 3,9 à 6,5 m/sec. pour la phase d'accumulation éolienne principale entre les rivières San et Leg.

L'analyse granulométrique nous permet également de documenter les intercalations de limon et de gravier qui indiquent une intervention d'autres processus, non-éoliens, durant la formation de la dune. Ce problème-ci pourtant sera discuté un peu plus en détail dans le chapitre suivant.

Par l'étude morphoscopique des grains de sable nous parvenons à déchiffrer les traits particuliers du milieu dont le matériel provient et du milieu dans lequel le transport du sable a eu lieu. C'est ici où se dégage la question de provenance du sable, donc de la source du matériel éolien et le problème de longueur du transport. Afin d'arriver à des conclusions définitives sur ce sujet pourtant il faut analyser tout un nombre d'échantillons provenant non seulement de l'arrière direct des dunes mais aussi du voisinage plus lointain.

Les résultats des recherches effectuées jusqu'ici semblent indiquer qu'il y a eu en général un transport relativement court. Le plus souvent c'était un transport „combiné” où le grain passe soit du milieu éolien en aqueux et ensuite est repris de nouveau par le vent, soit passe directement du milieu aqueux à l'éolien. Pendant chacune de ces étapes le matériel peut-être enrichi en des grains frais, ne portant aucune trace d'usure éolienne. La proportion de matériel éolien „propre” dans les dunes de la Pologne Centrale est considérablement plus importante dans les couvertures dunaires anciennes, où elle dépasse 40%, que jeunes — où elle tombe à 10% (Dylikowa, 1964). Il est évident que les rapports entre les classes particulières de grains varient entre les fronts dunaires et les endroits divers des faces au vent.

Il est intéressant de comparer les sables des dunes intérieures polonaises avec les sables des ergs sahariens. Les sables désertiques, de même que ceux de nos couvertures éoliennes, portent des traces du transport „combiné” — aqueux et éolien. On y trouve aussi un peu de grains étrangers non-usés. Il est rare pourtant de trouver toutes les trois catégories au même temps. C'est presque une règle —

et c'est le caractère particulier des dunes désertiques — qu'il n'y a, dans les fractions particulières, que deux catégories de grains, l'une d'elles dominant nettement sur l'autre. Sur le Grand Erg Occidental par exemple on a noté 20% non-usés et 80% ronds mats dans la fraction de 0,8 mm; il n'y a guère d'émoussés luisants. Dans la fraction de 0,27 mm on a compté 36% non-usés et 64% émoussés luisants; les ronds mats étaient entièrement absents. Dans la fraction de 0,13 mm il y a eu 56% non-usés et 44% émoussés luisants. Il arrive parfois qu'il n'y a qu'une seule catégorie de grains représentant 100% du sable. Il résulte de ces exemples, tirés de l'ouvrage de Cailleux et Tricart (1959) que les dunes sahariennes se caractérisent par une homogénéité du matériel beaucoup plus importante que nos dunes intérieures. Le fait que les dunes sahariennes possèdent, à côté des grains éolisés, du matériel portant des traces du transport aqueux ou du matériel frais, non-usé, est facile à expliquer par la position de ces dunes par rapport aux zones d'activité des eaux courantes, aux montagnes qui fournissent des débris frais etc.

Ces dernières années on a noté quelques essais d'application de la méthode de minéraux lourds au matériel dunaire (Wojciechowski, 1961). L'étude aussi bien de leur contenu dans le sable que de leurs espèces peut certainement jouer un rôle important dans la détermination des unités sédimentaires et dans l'établissement de la source du matériel. Un des caractères importants, intéressants du point de vue des recherches dunaires, est la résistance, surtout la résistance à la désintégration. Dans le sable dunaire devraient dominer les minéraux très résistants à la désintégration, tels que la tourmaline, l'augite, la pyrite, l'olivine, le grenat et autres (Cailleux, Tricart, 1959).

Les études détaillées de structure, et surtout de texture des dunes ont rendu possible, entre autres, à élucider des questions essentielles concernant leur évolution. Il s'agit du problème de nature des processus participant au façonnement des dunes. Les dunes considérées généralement comme des formes d'origine éolienne renferment parfois dans leur corps des éléments qui autant par la nature de leur matériel que par le type de leur structure indiquent qu'il y avait eu une participation d'autres processus dans le façonnement des dunes, intervenant à côté des actions éoliennes. A Katarzynów par exemple (Dylikowa, 1967) un de tels éléments non-éoliens probablement, dans les dunes, constituent les limons observés avant tout dans leurs parties les plus profondes en forme d'intercalations discontinues, parfois ondulées et alternant de temps en temps avec des lits de sable

fin ou de granules. Une autre fois cet élément étranger est constitué par des graviers dont la taille dépasse la capacité de transport éolien et qui révèlent fréquemment une stratification oblique. Ces séries de gravier gardent parfaitement leur lamination caractéristique pour ce genre de stratification (T w e n h o f e l, 1950). On y peut donc discerner aussi bien les parties basales (*bottomsets*) des strates particulières que frontales (*foresets*) et sommitales (*topsets*). Il faut remarquer ici, la fraction du matériel indiquant un transport certainement non-éolien mise à part, qu'on peut très rarement observer les parties sommitales des strates (*topsets*) dans les sables éoliens à stratification oblique. Le plus souvent elles ont été tronquées par des séries nouvelles de sable, déposées par un vent venant d'une autre direction déjà.

Ayant constaté la présence de ces éléments étrangers dans nos dunes il nous reste à résoudre la question de processus, sans aucun doute secondaires par rapport à l'activité du vent. On ne peut pourtant pas les passer outre en notre reconstruction des actions qui façonnent les dunes. En plus, il faut remarquer que les dunes ne constituent pas des formes plates. Elles possèdent des versants, donc des surfaces qui sont toujours particulièrement sensibles aux processus de dénudation typiques pour le domaine morphogénétique donné. L'intensité de ces processus est en rapport, entre autres, avec la pente et avec l'étape d'évolution de la couverture végétale ou bien de sa destruction. Les observations actuelles de l'activité morphogénétique sur les dunes polonaises indiquent que l'activité plus efficace du vent est limitée en général à des épisodes relativement courts pendant la saison sèche en été ou bien pendant des hivers froids lors de l'absence du tapis de neige. Son intensité est aussi parfois considérable pendant des autres saisons quand la condition de la sécheresse de la surface du sol est remplie, au commencement du printemps et en automne surtout quand, en plus, la couverture végétale constitue un moindre obstacle à la mise en mouvement des grains de sable. Aux saisons plus humides, pendant des averses qu'il y a chez nous depuis printemps jusqu'à l'automne tardif et pendant la fonte des neiges c'est le ruissellement qui se manifeste. Il arrive alors à la formation, à la surface des dunes, des couvertures de matériel le plus souvent sableux, sous des conditions particulièrement favorables voire graveleux. Ces couvertures possèdent parfois une nette stratification oblique.

Le second type de l'activité morphogénétique non-éolienne, qui participait probablement au façonnement des dunes, constituent les

processus nivéo-éoliens (Edelman, 1951). Leur effet c'est l'accumulation des séries composées de lits de matériel très fin alternant avec des lits grossiers. Dans les dépôts de ce genre il y a fréquemment des ondulations des paquets entiers du matériel ce qui constitue probablement l'effet de la microsolifluxion entraînant le matériel gorgé d'eau qui vient de se déposer.

Les intercalations du matériel indiquant la participation secondaire d'autres facteurs dans le façonnement des dunes, collaborant avec l'action éolienne, nous fait réfléchir s'il ne serait pas plus juste de parler plutôt des processus dunaires par rapport à nos dunes intérieures, c'est-à-dire de tout un complexe d'actions parmi lesquelles le vent constitue bien sûr le facteur décisif, et non pas de seuls processus éoliens.

Les processus périglaciaires dont les traces s'observent dans les dunes (Dylikowa, 1961a; Urbaniak, 1967) constituent une catégorie différente de phénomènes post-sédimentaires. Par conséquent il faut les discuter séparément.

La dernière étape des études de structure est une récapitulation et une confrontation des données morphologiques et morphométriques, concernant l'aspect extérieur des dunes, avec tous les caractères de leur structure interne. Le rôle essentiel y est joué par la comparaison de l'axe morphologique d'une part avec les axes structuraux des unités sédimentaires particulières de l'autre.

Si les dunes intérieures polonaises avaient été façonnées en entier au cours de l'activité d'un processus continu d'accumulation du sable, la direction du vent ayant été maintenue la même, on aurait eu probablement à faire avec une seule unité sédimentaire, essentiellement unique, dont l'axe structural aurait été concordant avec l'axe morphologique, comme cela a lieu dans toutes les formes récentes, façonnées par la suite de l'accumulation agissant le long d'un front large. Dans une telle dune il n'y aurait eu que des surfaces de tronquement liées à la migration de la dune pendant laquelle les parties frontales sont d'abord fossilisées et surélevées ensuite. Si la direction du vent reste stable, les axes structuraux de ces unités sédimentaires secondaires seront pourtant toujours parallèles non seulement entre eux-mêmes mais aussi à l'axe morphologique. Tout ce système subira évidemment un déplacement en espace conformément à la direction du vent.

Nos recherches disent pourtant une autre chose. Il en résulte notamment que la majorité de nos dunes constitue des formés complexes dans lesquelles les axes structuraux des unités sédimentaires

principales sont situés obliquement, voire perpendiculairement aux axes morphologiques actuels. Il nous semble qu'il y a deux genres de divergence entre les axes structuraux des unités sédimentaires particulières et l'axe morphologique actuel: 1. divergence croissante du sommet vers le bas des dunes. En ce cas-là, comme dans les dunes d'Aleksandrów et de Tuszyn par exemple (Dylikowa, 1958) la déviation des axes structuraux des séries supérieures de sable de l'axe morphologique actuel est considérablement moindre que celle des axes des parties plus profondes; 2. la divergence diminuante du sommet vers la base des dunes dont l'exemple constitue la dune des environs de Magdalenów dans le Bassin de Szczerców (Gawlik, 1969).

Il nous semble que la méthode de comparaison des rapports réciproques des axes structuraux et de l'axe morphologique, appliquée à toute forme dunaire, peut nous fournir du matériel intéressant sur le processus de transformation des dunes. On va revenir à cette question dans le chapitre suivant.

LES PHASES DE DÉVELOPPEMENT DES DUNES

Il n'y a aucun doute que c'est l'avance des études visant une reconstitution du cours de l'activité éolienne depuis le Tardiglaciaire, la phase de décroissance du Würm y comprise jusqu'à l'Holocène, qui appartient aux succès les plus éminents de ces 10 dernières années. C'est ce domaine de la recherche dunaire précisément qui demande une collaboration très étroite entre les géomorphologues et les paléobotanistes et ceux des pédologues qui s'intéressent aux sols fossiles. Une aide très précieuse y apportent également les recherches archéologiques sur le Paléolithé le plus jeune et le Mésolithé. C'est l'analyse au C^{14} enfin qui nous apporte une confirmation certaine de l'ensemble de conclusions dynamiques et stratigraphiques.

Le terme: phase de formation des dunes veut dire, par rapport aux dunes intérieures de la Pologne — étape d'accumulation du sable qui en sa masse essentielle est transporté par le vent et étape qui, au même temps, confère à cette masse de sable la forme de dunes. Toute phase de formation des dunes est en principe liée avec un type de milieu climatique défini, un tel milieu qui favorise l'action libre du vent. Sous les conditions du Tardiglaciaire en Pologne Centrale les phases de formation des dunes correspondent à des retours d'un climat subarctique, donc frais et sec, du Dryas inférieur, moyen et supérieur. Un fait intéressant a été noté par Wasylkowa (1964). S'appuyant

sur une analyse des complexes de plantes aquatiques elle a constaté un abaissement, par rapport au Bölling, à l'Alleröd supérieur et à la période préboréale, du niveau d'eau du lac Silne Błoto, adhérent à la dune de Witów, au commencement du Dryas ancien et au Dryas moyen et supérieur. Cela correspondait certainement à un abaissement général de la nappe phréatique — la circonstance favorable à l'action éolienne. Les phases de formation des dunes particulières du Tardiglaciaire ont été séparées, l'une de l'autre, par des oscillations climatiques plus chaudes et plus humides au Bölling et à l'Alleröd. Cet échauffement et une plus grande humidité favorisaient le développement du sol et l'expansion de la forêt. Simultanément, la nappe phréatique montait, le phénomène constaté à Witów par Wasyli^kowa, qui commençait vers la fin du Dryas inférieur et durait jusqu'au Bölling. La même montée s'est répétée à l'Alleröd supérieur et en période subboréale. Sous de telles conditions le transport et l'accumulation éoliens soit s'arrêtaient entièrement, soit étaient considérablement freinés, tandis que le relief éolien précédent était stabilisé. Les oscillations climatiques du Tardiglaciaire en Pologne Centrale sont pleinement documentées par les études palynologiques et la dation au C¹⁴ (Chmielewski, Chmielewska, 1958; Chmielewska, Wasyli^kowa, 1961; Wasyli^kowa, 1964; Tobolski, 1965). Ces derniers temps un critère supplémentaire est fourni par les recherches paléopédologiques de Manikowska sur le sol d'Alleröd (1965, 1969) qui facilitent la subdivision des couvertures de dunes du Dryas.

La conception paléogéographique de l'évolution du relief dunaire consiste en une reconstruction aussi précise que possible du cours complet des événements qui prend en considération aussi bien les phases de formation des dunes propres que les épisodes de stabilisation. A l'étape actuelle de recherches il se dégage, comme un des points essentiels, la nécessité d'un accord terminologique qui rendrait possibles une définition et une subdivision unéquivoques des phases particulières de formation des dunes. En parlant théorétiquement, à toute phase de formation devraient correspondre des formes différentes de relief dunaire, car chaque phase de formation avait été liée à une autre direction des vents dominants. En une telle situation il nous paraît juste d'avancer un principe de base qui permettrait d'éviter les malentendus possibles.

Si l'on admet que les dunes paraboliques constituent l'étape culminante du développement de nos dunes intérieures on pourrait, dans une région donnée définir, pour toute période de formation des

dunes, le façonnement des dunes paraboliques comme la *phase principale* de formation des dunes (Dylikowa, 1958; Wojtanowicz, 1965).

En Pologne Centrale cette phase-ci avait eu lieu au Dryas moyen. Les vents venant principalement des directions NW et W avaient façonné des arcs de dunes paraboliques qui constituent la charpente du relief dunaire de la Pologne Centrale tel qui, en état plus ou moins complet, s'est préservé jusqu'à l'ère actuelle. Il est évident qu'au voisinage de formes paraboliques parfaites, finies, il y a probablement aussi de certaines formes dunaires initiales, telles que des champs de sable, des cordons, des arcs dunaires aux bras courts et d'autres dont l'évolution a été interrompue par l'échauffement climatique de l'Alleröd. Afin de décider si toutes ces formes-là appartiennent à la phase d'accumulation éolienne principale il faut des études spéciales qui permettraient de définir leur âge.

La phase suivante, pendant laquelle les dunes paraboliques ont subi un remodelage dans un milieu aérodynamique nouveau devrait donc être appelée *phase de transformation* des dunes (Dylikowa, 1958; Wojtanowicz, 1965). En Pologne Centrale cette phase-ci correspond au Dryas supérieur. Tout un nombre de faits témoigne qu'il n'y avait eu alors qu'une transformation assez superficielle des dunes paraboliques qui n'ont pas effacé leur tracé essentiel. Les mêmes faits indiquent qu'il y a eu alors des vents S, SW ou W. Dans les dunes des environs de Łódź on constate généralement une puissance considérablement plus faible des séries de sable représentant la phase de transformation par rapport aux sables de la phase principale¹. La transformation des dunes, de leurs bras surtout qui sont particulièrement exposés à l'action des vents SW et S, a trouvé son expression en structure des sables de la phase de transformation et en traits morphométriques des dunes y liés, ce qui s'exprime par une inversion de l'asymétrie primitive des versants des bras sud (Dylikowa, 1958). Ces conclusions concernant le mécanisme de la transformation des dunes paraboliques sont également soutenues par les observations de Manikowska (1969) sur la répartition des lam-

¹ Une exception en constituent les parties frontales des dunes, sur lesquelles l'entassement du sable durant la phase de transformation peut produire des séries dont l'épaisseur dépasse celle de la série principale. Un tel exemple constaté sur les dunes sur la moyenne Prosna a été présenté aux participants de la 2^e Conférence Dunaire de la Société Géographique de Pologne par K. Rotnicki.

beaux du paléosol d'Alleröd présents uniquement aux versants nord ou nord-ouest, protégés contre l'action destructive des vents S et SW.

Il reste encore à résoudre le problème d'activité éolienne pendant la période précédant la phase principale et suivant la phase de transformation. Une accumulation du matériel et un modelage initial ont dû avoir lieu avant la phase principale. Dans certaines régions ces processus préparatifs agissaient pendant la même oscillation climatique au cours de laquelle les dunes paraboliques ont été façonnées. En ce cas-là évidemment, rien ne nous autorise à distinguer une différente phase de formation. C'est la dune de Witów, située dans la vallée de la Malina à l'intérieur de la Pradolina Varsovie—Berlin, près de Piątek, qui peut servir d'exemple d'une telle variété d'évolution „accélérée” (Chmielewska, Chmielewski, 1960; Dylikowa, 1958; Wasylińska, 1964). La phase principale constitue ici la première phase de formation de la dune. Elle a pris place au Dryas moyen. Au-dessus du dépôt du Bölling on n'y a trouvé aucune trace de l'action éolienne. Dans la dune de Katarzynów, située à 11 km vers l'ouest de Witów dans la zone marginale de la pradolina au fond d'une petite vallée sèche à sens W—E il y a, au-dessous du Bölling, une couverture sédimentaire distincte qui, à côté du matériel dû au ruissellement ou au processus nivéo-éoliens, contient du matériel éolisé. Parce que nous y avons affaire à une phase indépendante de formation des dunes, correspondant au Dryas inférieur il nous semble juste de la mettre à part comme la *phase initiale* (Dylikowa, 1964). Le fait que la couverture éolienne de la phase initiale forme une nappe tapissante le fond de la vallée sèche indique qu'au Dryas inférieur il n'y avait eu, dans la vallée, qu'une accumulation du matériel dans lequel ensuite, au Dryas moyen, les dunes ont été façonnées. Les dunes de Katarzynów n'ont pas de tracé parabolique car les versants de la vallée empêchaient certainement le développement des bras. Elles ne forment donc que plusieurs cordons transversaux par rapport au talweg.

Les exemples des dunes de Witów et de Katarzynów que nous venons de rappeler prouvent dans quelle mesure est-il nécessaire de tenir compte des conditions morphologiques locales quand on tire des conclusions sur les commencements de l'action éolienne dans une région donnée. Les deux régions dunaires mentionnées sont situées si près l'une de l'autre qu'une différence notable en conditions climatiques est impossible. L'absence de la couverture éolienne correspondante à la phase initiale à Witów et sa présence à Katarzynów n'est donc que l'effet des différences locales du milieu, de la topographie,

des conditions hydrographiques et végétales avant tout. Ce sont les mêmes différences qui avaient décidé de l'évolution dunaire au cours de la phase principale comme nous avons dit tout à l'heure.

La constatation et la datation, en Pologne Centrale (environs de Łódź, pradolina Varsovie—Berlin, Bassin de Szczerców) des couvertures dunaires de la phase principale et de la phase de transformation aussi bien que la découverte d'une série éolienne à Katarzynów correspondante à la phase initiale semblent pourtant être évidentes. Le problème devient pourtant beaucoup plus difficile s'il s'agit du cours des actions éoliennes à l'Holocène.

Bien que tout l'Holocène soit une période considérablement plus chaude que le Tardiglaciaire, il y a eu, en son cours, des reprises des processus éoliens, parfois même répétées. En Pologne Centrale cette reprise du façonnement des dunes, de l'activité éolienne avant tout, s'est manifestée surtout sur les anciens champs de dunes. Elle consistait (dans plusieurs régions durant même aujourd'hui) en déflation des sables et en destruction de l'ancien relief dunaire là où il n'y a pas de couverture végétale. Il nous paraît donc juste d'appeler cette étape d'évolution des dunes de la Pologne Centrale *phase de destruction* (Dylikowa, 1958). A l'étape actuelle de recherches il nous est difficile encore de déterminer pendant quel épisode de l'Holocène il y a eu des conditions particulièrement favorables à la reprise des actions éoliennes. Le profil de la dune de Katarzynów (Dylikowa, 1964) nous permet de supposer que la phase de destruction a pris place pendant la période boréale. A Katarzynów il y a notamment, directement au-dessus de la série liée au Dryas supérieur (phase de transformation), un horizon de sol continu, préboréal probablement, recouvert par une série de sables amorphes correspondant à la phase de déflation de la dune. Ceci n'est pourtant qu'une hypothèse fondée uniquement sur une séquence continue de dépôts particuliers et non pas confirmée encore par des données palynologiques. Tobolski (1965), qui a effectué des analyses palynologiques sur les dunes de la vallée de la moyenne Prosna constate, à Węglewice entre autres, deux reprises de l'activité éolienne au cours de la période atlantique et, ensuite, un autre retour des processus éoliens vers la fin de la période sub-boréale. Une comparaison entre les données obtenues à Węglewice avec celles de Katarzynów, admettant que l'hypothèse d'âge préboréal du paléosol le plus haut de Katarzynów soit confirmée, indique que la reprise des actions éoliennes à l'Holocène de la Pologne Centrale est liée avec la destruction locale du tapis végétal, due peut être à l'activité humaine.

Le cours des processus éoliens et le développement des dunes de la Pologne Centrale au Tardiglaciaire, c'est-à-dire durant la phase de décroissance du Würm, ont été présentés plus en détail dans d'autres ouvrages (Dylikowa, 1964, 1968). C'est pourquoi nous nous bornerons à joindre un tableau présentant une récapitulation des données les plus importantes illustrant le développement des dunes en Pologne Centrale (tabl. I).

LA POSITION DES DUNES LONGITUDINALES,
TRANSVERSALES ET PARABOLIQUES AU CYCLE D'ÉVOLUTION
DU RELIEF DUNAIRE

La conception paléogéographique du relief dunaire, fondée sur une analyse détaillée de structure et de texture des couvertures dunaires et sur une interprétation des horizons correspondant aux arrêts successifs de l'accumulation du sable par la suite d'un changement du climat frais et sec au climat plus chaud et plus humide devrait embrasser aussi, entre autres, les problèmes de transformation des dunes élémentaires.

Quand, au cours des études des complexes dunaires, on constate qu'il y a souvent des dunes paraboliques typiques à côté de dunes transversales et longitudinales par rapport aux vents venant du secteur ouest, on se pose la question s'il y a une règle qui commande la succession des transformations d'unes formes dunaires en autres. C'est-à-dire si la formation des dunes paraboliques par exemple devrait être réellement reconnue comme l'expression ultime de l'évolution des formes dunaires — qui serait précédée par la formation des dunes longitudinales et terminée par le commencement de l'apparition des dunes transversales, ou bien *vice-versa*. Enfin, si ce sont les cordons simples de dunes longitudinales et transversales qui apparaissent les premiers afin de s'unir ensuite en des arcs paraboliques. Le problème s'il y a une règle en évolution des formes dunaires ou non est une de ces questions qui demandent certainement des études ultérieures.

Dans les travaux effectués jusqu'ici il y a une grande divergence d'opinions sur le sujet de la succession en évolution des formes dunaires que nous venons de mentionner. Kaczorowska-Kobendzina en discutant ce problème-là à propos des dunes de la Forêt de Kampinos avait exprimé, en 1926 déjà, l'opinion que ce sont les cordons qui apparaissent les premiers. L'orientation de leurs axes morphologiques est selon elle commandée par la configuration des

terrains marécageux qui avaient constitué des zones où la marche du sable s'arrêtait. Les dunes paraboliques n'apparaîtraient que plus tard. Une opinion pareille est énoncée par Urbania^k (1967) au sujet des dunes du Bassin de Płock. Étudiant les cordons dunaires à direction WE à peu près elle les considère comme des formes indépendantes, façonnées par les vents venant du nord et situe leur mise en place dans la phase d'accumulation éolienne principale. Le développement des dunes paraboliques est lié, par elle, avec la phase de remodelage d'anciens cordons pour lequel elle suppose la succession suivante des événements: (1) l'apparition du cordon à direction WE qui deviendra plus tard le bras sud; (2) la formation du front de la dune parabolique; (3) le façonnement du bras nord. Par contre, Mrózek et Nowicka (1958) considèrent les dunes paraboliques du Bassin de Toruń—Bydgoszcz comme des formes anciennes et les cordons comme l'effet de leur destruction. Nos propres études parlent en faveur de la pareille succession (1958). L'analyse des dunes des environs de Łódź indique que le façonnement des dunes paraboliques à des arcs serrés et à des bras à peu près égaux, avait pris place lors de la phase d'accumulation éolienne principale. Au cours de la phase de transformation ces formes ont subi un déchirement en cordons longitudinaux et transversaux. Le déchirement n'a pas dû être très avancé comme on peut en juger d'après les faits suivants: (1) préservation jusqu'aujourd'hui du tracé général à forme d'un arc; (2) la puissance considérablement plus faible des séries de sable liées à la phase de transformation; (3) les mêmes traits de structure dans toutes les séries inférieures de sable appartenant à la phase d'accumulation éolienne principale, ce qui nous permet de lier les dunes longitudinales et transversales en une seule forme, c'est-à-dire en dunes paraboliques. Il est intéressant de rappeler ici le fait observé par Małkowski en 1912 déjà, lors de ses études faites sur les dunes des environs de Sadowne — les hauteurs considérablement plus importantes des dunes transversales par rapport aux formes longitudinales et le tracé d'un arc plat aux bras dirigés au vent que l'on observe souvent parmi les dunes transversales. Ces observations-ci parlent en faveur d'une interprétation des dunes transversales comme d'anciens fronts de dunes paraboliques et des dunes longitudinales comme des fragments de leurs bras.

Tout ce problème attend encore une résolution qui n'est possible qu'en voie des études détaillées de structure et de texture des formes choisies et d'une comparaison de leurs résultats avec les observations morphologiques autant précises. Il nous semble qu'un rôle important

y peut être joué par une étude comparative entre les axes morphologiques aussi bien des complexes dunaires entiers que des formes simples, élémentaires, et les axes structuraux des couvertures dunaires respectives. Dans les dunes longitudinales, ou bien transversales, jeunes, donc post-paraboliques, on pourrait supposer l'existence d'une couverture correspondante à la phase de transformation, considérablement plus développée et d'une concordance plus grande entre les axes morphologiques et les axes structuraux. S'il y a une nette divergence entre ces axes-là dans les cordons actuels, la puissance de la couverture liée avec la phase d'accumulation éolienne principale étant également plus grande on devrait penser qu'il y s'agit d'anciennes dunes paraboliques. A l'étape actuelle des recherches nous sommes loin encore d'une généralisation de ces points de vue. Il faut rappeler ici que les études menées jusqu'ici constatent aussi bien des exemples de la concordance des deux axes entre eux dans les parties sommitales des dunes que des faits contraires (p. 59). Peut être donc les dunes longitudinales et transversales apparaissent aussi bien comme une annonce d'une dune parabolique ultérieure (formes préparaboliques), que comme des formes indiquant sa dégénération (formes postparaboliques). Il nous semble en tout cas que la forme d'une parabole peut être considérée comme l'étape culminante d'évolution des dunes intérieures.

Un problème à part constitue la détermination de la forme morphologique de la couverture éolienne la plus ancienne, attribuée à la phase initiale de la formation des dunes liée avec le Dryas inférieur. La seule localité connue en Pologne où on l'a constatée se trouve aux environs de Katarzynów (Dylkowa, 1964, 1967). Les considérations au sujet de la forme de cette couverture possèdent donc le caractère purement théorique et sont fondées sur les observations des processus actuels d'accumulation du sable sur des surfaces plates, dégagées. Il y s'agit bien sûr de la première étape de la formation de la couverture sableuse sur des surfaces fraîches où jusqu'alors il n'y avait pas de sables. Si cette surface est complètement lisse, le sable est incessamment agité par tout souffle du vent et forme des nappes au tracé irrégulier en plan horizontal et à forme d'une lentille en coupe aussi bien parallèle que transversale par rapport au vent. Au commencement il n'y a pas de différence entre la pente de la face au vent et de celle sous le vent. Quand la surface n'est pas lisse mais raboteuse et parsemée de cailloux et des touffes de plantes le sable se dépose en forme des amoncellements, pareils à ceux de neige, du côté au vent de chacun de ces obstacles, tandis qu'entre

eux il continue de se déplacer librement, de manière pareille qu'au premier cas. Sur les amoncellements apparaît tout de suite une asymétrie des versants qui sont très raides du côté sous le vent, à pente voisine de l'angle de repos, et relativement doux du côté opposé. Quand il y a des vents venant des directions instables, variables, l'obstacle peut-être entièrement entouré par l'amoncellement de sable, voire enseveli. C'est de façon pareille qu'a lieu l'accumulation d'une neige sèche et friable (Stankowski, 1963). Il nous semble que la série la plus ancienne de sable de Katarzynów pourrait correspondre au premier type de couvertures. On peut en juger d'après sa stratification horizontale, ou inclinée légèrement vers le côté sous le vent et qui exprime ainsi l'adaptation de la première couverture de sable à la topographie locale d'un fond plat de vallée sèche sur lequel le transport et l'accumulation du sable ont pris place.

L'analyse de la morphologie des dunes exige, entre autres, une étude précise des conditions locales, topographiques, hydrographiques et végétatives du terrain sur lequel les complexes dunaires ont été façonnés. Il faut tenir compte notamment d'une possibilité d'accumulation forcée par le parcours tel ou autre des versants d'une vallée ou d'un bassin où les dunes se formaient ou par la présence des tourbières, des marécages etc. Ce problème-ci avait été relevé par Lenciewicz déjà (1922) dans son étude de la répartition des dunes intérieures en Pologne. Ces derniers temps il a été repris par Stankowski (1963) qui souligne surtout le rôle joué par la végétation dans la formation des types déterminés de dunes. Les cordons transversaux et les barkhanes sont selon lui façonnés quand la végétation est absente, tandis que la formation des dunes longitudinales et paraboliques prend place avec une participation de la végétation.

Les dunes de la Forêt de Kampinos, formées sur les niveaux de terrasses de la pradolina Varsovie—Berlin au parcours WE, possèdent le tracé des paraboles assez régulières aux bras ouverts et dirigés vers le NW, les bras sud étant d'ordinaire plus longs et plus hauts que les rameaux nord. Un trait caractéristique intéressant y constitue le tracé des complexes dunaires entiers. Aussi bien sur la basse que sur la haute terrasse ils présentent des paraboles aux bras nord inachevés. Aussi bien les axes morphologiques du premier que de second ordre y produisent donc l'aspect des paraboles. Il en est autrement dans la région dunaire voisine, dans la partie méridienne de la vallée de la Vistule, au sud de l'embouchure du Bug où le tracé aussi bien des dunes élémentaires que de leurs complexes change

progressivement. Au centre du Bassin de Varsovie, où les vallées méridiennes se croisent avec les vallées au sens WE, les dunes de la rive droite de la Vistule gardent encore le tracé des paraboles, leurs bras sont pourtant considérablement moins longs. Les formes pareilles peuvent être tracées plus loin vers l'est dans la vallée du Bug. Au sud de Varsovie par contre, la forme des dunes, à la rive droite surtout, change de pair avec le changement de la direction de la vallée. Peu à peu ce sont des arcs à la partie frontale allongée et à des bras relativement courts, dirigés vers le NW, de même que dans la Forêt de Kampinos, qui commencent à dominer. Ce n'est que sur les interfluves du côté Est de la Vistule que les dunes „reprennent” la forme des paraboles.

Dans toutes les régions mentionnées les dunes paraboliques sont accompagnées par d'autres formes transversales et longitudinales surtout. Les différences pareilles en formes dunaires peuvent être observées également entre les dunes de la pradolina Varsovie—Berlin, entre Konin et Koło d'une part, et celles de la vallée méridienne, étroite, de la Prosna de l'autre. Il est certain que les traits géomorphologiques directifs, exprimés par le réseau fluvial en grille et les traits topographiques, tels que la largeur de la vallée, la hauteur et la netteté de ses flancs et de ses terrasses particulières avaient joué un rôle important dans l'accumulation du sable, ce qui, par conséquent, s'est reflété en formes variables aussi bien des dunes élémentaires que de leurs complexes. Une des différences les plus frappantes consiste en changement du rapport entre le front de la dune et ses bras et en contraste entre la longueur du bras sud par rapport à celle du bras nord.

Le phénomène le plus commun chez nous, dans les pradolinas surtout, constituent les bras sud considérablement aggrandis, et qui lient parfois même tout un nombre de dunes paraboliques en un ensemble. Les résultats des observations faites aux environs de Łódź nous avaient mené à la conclusion que le développement excessif des bras sud est lié avec l'apparition des vents venant du secteur SW ou S, ce qui n'a pris place, en Pologne Centrale, qu'au Dryas supérieur (voir p. 61). Wojtanowicz, dans son étude consacrée aux dunes entre le San et le Łęg (1965), décrit un groupe de dunes caractérisé par un développement plus fort des bras nord orientés parallèlement à peu près à la vallée du San qui y coule du SE vers le NW. Il nous semble, en ce cas-là, que l'accroissement des bras nord, favorisé par les vents NW, avait dû prendre place simultanément avec le façonnement des dunes paraboliques, donc pendant la phase

d'accumulation éolienne principale déjà, que l'auteur situe au Dryas inférieur. L'explication complète de la disproportion existant entre les bras des dunes paraboliques demande évidemment des études ultérieures, car les conclusions atteintes jusqu'à présent sur ce sujet ne se prêtent pas encore à la généralisation.

Urbania k (1967) mentionne dans le Bassin de Płock des cordons dunaires à direction WE. Leur structure indique que les vents dominants, lors de leur accumulation, venaient du Nord. Le fait ne devient clair qu'après une analyse de la vallée de la Vistule près de Płock. La continuité de la vallée profonde et large et son orientation avaient dû créer des conditions locales particulières qui favorisaient le fléchissement des vents NW au sens NS à l'intérieur de la vallée.

La distinction des trois seules catégories de formes dunaires, mentionnées dans le titre du chapitre, parmi la grande richesse de formes naturelles constitue évidemment une simplification. Nous l'avons faite pourtant sciemment; n'ayant pour but qu'une esquisse du problème d'évolution des dunes intérieures qui appartient certainement aux questions plus difficiles, exigeant des études très minutieuses. On a fait abstraction, entre autres, des barkhanes décrits plusieurs fois en Pologne (Pernarowski, 1958; Stankowski, 1959, 1963; Wojtanowicz, 1965), c'est-à-dire des croissants aux bras symétriques orientés au même sens que la direction du vent. Le fait qu'on trouve ces formes-là en Pologne, liées certainement aux vents venant du secteur ouest également — ce qui ne fait plus de doute — témoigne vraisemblablement qu'il y avait eu localement des conditions que Baulig (1959) a très bien définies comme „aridité morphologique”. Dans nos conditions cette sécheresse morphologique s'exprimait probablement par l'existence des champs de sable mobile, dépourvus de toute végétation. En cas particuliers les barkhanes peuvent constituer des formes commandées par les conditions locales. Un bel exemple en est cité par Stankowski aux environs de Czarnków. Les croissants de quatre barkhanes y entourent notamment du côté ouest une dépression de fusion arrondie, qui avait empêché la marche du sable.

LA ZONALITÉ EN RÉPARTITION DES DUNES AUX CARACTÈRES MORPHOLOGIQUES ET STRUCTURAUX PAREILS

À côté du groupe de problèmes représentant le sens dynamique des recherches dunaires en Pologne, que nous venons d'étudier, apparaît la question de variabilité des formes de dunes en espace, aussi

bien au sens horizontal que vertical. Nous avons énoncé déjà, dans le chapitre précédent, quelques remarques au sujet de ce sens d'études que l'on pourrait appeler spatial, en tant que touchant la question de variabilité de la forme de dunes, dans l'espace.

Le problème de zonalité des dunes polonaises s'est dégagé à partir des premières études dont les auteurs attiraient attention sur les différences de la forme de dunes et sur leur fond géomorphologique. C'est un article de Lencewicz „Les dunes intérieures de la Pologne” (1922) qui mérite une attention particulière. Étant un observateur pénétrant, doué en plus d'une rare intuition, Lencewicz avait formulé plusieurs conclusions dynamiques et génétiques, basées avant tout sur une caractéristique du fond géomorphologique et sur une description détaillée aussi bien des champs de dunes que des formes élémentaires et qui restent jusqu'à présent valables. La carte des „paysages postglaciaires” jointe à cet ouvrage constitue la première tentative d'une présentation de la répartition des dunes intérieures sur le territoire de toute la Pologne. La présentation descriptive de la répartition des dunes en Pologne, amorcée par Lencewicz et complétée ensuite par l'émission des cartes géologiques et géomorphologiques générales et partiellement même détaillées, et par toute une suite d'études régionales, crée les cadres à des études ultérieures. Parmi les problèmes représentant le sens spatial des études dunaires il y a deux qui se dégagent comme les plus importants. Le premier c'est la question de zones de dunes intérieures à l'échelle de la Pologne entière et le second — l'étagement des formes dunaires à l'intérieur de grandes unités géomorphologiques particulières, telles que les pradolinas, vallées de grandes rivières, bassins d'anciens lacs de barrage, lambeaux d'interfluves etc. A l'étape actuelle des recherches il est trop tôt encore de dresser des synthèses au domaine de deux problèmes mentionnés. On ne dispose pas encore d'un nombre suffisant de faits bien documentés qui nous permettraient de dégager certaines lois. Il vaut le peine, quand même, d'attirer une plus grande attention sur ces questions-là, car elles constituent un des éléments importants de la course des événements au Quaternaire de la Pologne.

LA ZONALITÉ DU RELIEF DUNAIRE EN POLOGNE

La détermination des zones particulières exige un établissement des relations spatiales et chronologiques entre les complexes dunaires de la Pologne du Nord, de la Pologne Centrale et de la Pologne du Sud.

Le problème fondamental qui attend toujours sa résolution constitue la détermination du nombre de phases de formation des dunes dans les régions particulières de la Pologne et la définition de l'âge de chacune de ces phases. *Lencewicz*, dans la conclusion de son ouvrage cité tout à l'heure (1922) parle ainsi à propos des dunes de la Pologne du Sud: „...il est possible que les dunes ont commencé à s'y former plus tôt qu'au nord. Le développement de celles-là en tout cas a dû continuer encore à l'époque de la formation des dunes de la Pologne Centrale. En ce temps-là pourtant les dunes de la Pologne du Sud étaient déjà davantage envahies par la végétation que les dunes des régions sableuses fraîches, d'où leur développement entravé. Aujourd'hui elles se trouvent à l'étape plus avancée que les dunes de la Pologne Centrale”.

Une autre position est prise par *Wojtanowicz* (1965) qui s'appuyant sur les résultats de ses recherches dans le Bassin de Sandomierz énonce la conclusion que les processus éoliens agissaient simultanément en toute la Pologne. Rappelons ici que l'hypothèse d'une possibilité de la formation simultanée des dunes en Pologne entière avait été posée également par *Galon* (1958).

Une comparaison des étapes d'évolution des dunes sur les territoires des Glaciations Mindel, Riss et Würm demande que l'on admette une base commune pour nos considérations. Il nous semble que c'est l'âge de la phase d'accumulation éolienne principale qui pourrait y servir. Si la supposition que les dunes paraboliques constituent des formes les plus parfaites et les plus complètes du relief éolien continental est juste et étant donné que l'on peut les rencontrer sur presque tout le territoire de la Pologne, il serait souhaitable de déterminer l'âge de l'épisode pendant lequel ce genre de formes dunaires s'est manifesté dans les régions particulières du pays. Il semble que la supposition de *Lencewicz*, basée sur des prémisses théoriques, devrait être confirmée par la découverte des dunes paraboliques les plus anciennes en Pologne du Sud et les plus jeunes au Nord.

Parmi les travaux consacrés à cette partie de la Pologne du Sud qui porte les seules traces de la Glaciation Mindel qui nous sont connus, c'est l'étude de *Wojtanowicz* (1965) qui, à cause du problème discuté, mérite une attention particulière. Il s'occupe de la région éolienne du Bassin de Sandomierz entre le San et le Leg où l'auteur, s'appuyant sur les datations paléobotaniques des dunes (*Mamkowska*, 1962), énonce la conclusion que la formation des dunes paraboliques, c'est-à-dire la phase d'accumulation éolienne principale avait pris place entre le Dryas inférieur et moyen inclusivement. Le

manque de données sur les conditions climatiques et floristiques du Bölling ne permet pas une datation plus précise de la période de formation des dunes paraboliques. Il nous semble que celles-ci devraient apparaître plus tôt dans le Bassin de Sandomierz qu'en Pologne Centrale, c'est-à-dire au Dryas inférieur, peut-être même au pléni-Würm, après la fin de la déposition du loess le plus jeune (Maruszczak, 1958; Maruszczak, Wojtanowicz, 1967; Mycielska-Dowgiałło, 1965). La phase de transformation des dunes a pris place, selon Wojtanowicz, au Dryas supérieur et en période préboréale. Du moment du développement d'un tapis de sol continu et de la forêt, en période boréale, les actions éoliennes se sont arrêtées complètement.

En Pologne Centrale, comme nous venons de mentionner dans le chapitre précédent, la phase d'accumulation éolienne principale est attribuée au Dryas moyen. Ce fait-ci paraît être suffisamment documenté, ce qui rend possible également de lier la phase de transformation au Dryas supérieur. Il ne reste donc à résoudre que le problème de la phase de destruction à l'Holocène.

Le territoire de la Pologne du Nord, appartenant au domaine de la Glaciation Baltique, possède une littérature relativement riche, concernant soit des formes dunaires élémentaires, soit des ensembles entiers de dunes paraboliques de la vallée de la Noteć, de la plaine interfluviale de Gniezno, de la région entre la Warta et la Noteć et des Bassins de Toruń-Bydgoszcz, de Pyzdry et de Szczecin (Kozarski, 1962a, 1963; Krygowski, 1961; Pilarczyk, 1958, 1962; Stankowski, 1959a, 1961; Nowaczyk, 1967). Ce qui est surtout intéressant c'est une étude comparative entre les dunes du sandre de Nowy Tomyśl et des Bassins de Gorzów et de Szczecin effectuée par Stankowski (1963) et une analyse récente des dunes du Bassin de Płock par Urbaniaś (1967). Les deux travaux sont fondés sur la méthode structurale.

Stankowski pose l'hypothèse suivante au sujet des dunes sur le sandre de Nowy Tomyśl: „La formation des dunes y a eu lieu au Stade Poméranien (plutôt phase poméranienne — remarque de l'auteur) ou pendant une oscillation qui avait précédé ce Stade, quand à la surface du sandre les dunes longitudinales et paraboliques se sont formées” (phase d'accumulation éolienne principale?). Au Dryas supérieur Stankowski attribue la possibilité de la formation d'une série de sable amorphe (phase de transformation?) et aux périodes de climat frais suivantes — les processus de dégradation des dunes (phase de destruction?). Plus loin Stankowski mentionne

encore que l'accumulation éolienne s'est accrue pendant la période atlantique après la phase d'optimum climatique.

Discutant la question d'âge des dunes sur le territoire choisi du Bassin de Gorzów *Stankowski* formule la conclusion suivante au sujet des dunes les plus anciennes de cette région-là, sur les plus hautes terrasses de la partie ouest du pays entre la Warta et la Notec: „Ce sont les dunes paraboliques et transversales” (phase d'accumulation éolienne principale?). Après *Krygowski* (1961) et *Pilarczyk* (1962) il les attribue au Dryas supérieur tout en admettant la possibilité de leur développement au Dryas moyen également. Au Dryas supérieur selon *Stankowski*, a pris place la formation des séries amorphes et le remodelage des dunes (phase de transformation?). Les dunes paraboliques et longitudinales de la basse terrasse sont mises en rapport par lui avec le Dryas supérieur (phase d'accumulation éolienne principale?) et les séries de sable leur superposées avec la période subboréale (phase de transformation ou de destruction?).

Dans la même zone, c'est-à-dire sur le territoire de la phase de Poznań, se trouvent les dunes du Bassin de Płock décrites par *Urbaniaik* (1967). Elle constate dans cette région-ci la présence de deux séries de sable représentant 5 phases de formation des dunes: phase la plus ancienne, phase d'accumulation éolienne principale, phase de modelage (fin du développement des dunes paraboliques), phase de remodelage et phase de destruction. Toutes ces phases sont attribuées à une seule période de la formation des dunes qui, selon *Urbaniaik*, „s'est terminée entièrement avant l'Holocène, peut-être même avant l'Alleröd. L'absence d'interruptions de sédimentation sableuse peut indiquer que le processus entier de la formation des dunes est clos dans une phase plus froide du Tardiglaciaire, au Dryas moyen le plus probablement.”

Les dunes les plus anciennes du Bassin de Szczecin, les dunes paraboliques entre autres, n'ont été façonnées, selon *Stankowski*, qu'au Dryas supérieur ou pendant la période préboréale.

La récapitulation des localités choisies en Pologne du Sud, en Pologne Centrale et en Pologne du Nord présente une tentative de comparaison de toutes les données sur l'âge des dunes. Au même temps elle illustre l'état des recherches au domaine de la chronologie des dunes. On y a omis entièrement, comme étant insuffisamment documentées, les hypothèses qui admettent la possibilité des actions éoliennes avant le Dryas inférieur. Il n'est pas clair encore le rapport des couvertures de sables éoliens au loess en Pologne du Sud. Il reste

aussi à résoudre le problème d'âge des séries éoliennes les plus anciennes en Grande Pologne et la question de course des processus éoliens holocènes en Pologne Centrale. En plus, on n'a réussi non plus de déterminer partout la position stratigraphique des dunes paraboliques représentant la phase d'accumulation éolienne principale. Il est donc difficile de formuler maintenant la réponse à la question si les processus éoliens avaient été simultanés en Pologne entière ou non. Ce qui mérite notre attention en tout cas c'est un âge décidément jeune des dunes du Bassin de Szczecin. Le problème de zonalité des dunes intérieures de la Pologne demande certainement un grand nombre d'études ultérieures (tab. II).

L'ÉTAGEMENT DU RELIEF ÉOLIEN

Dans toutes les régions de la Pologne se manifeste une différenciation verticale du relief éolien, signalée par plusieurs auteurs (Mojski, 1960; Kozarski, 1962; Stankowski, 1963; Wojtanowicz, 1965 et autres). Étant donné que l'on avait constaté des caractères nettement différents entre les dunes formées sur les terrasses fluviales, sur les fonds et au voisinage des flancs des bassins ou bien aux interfluves dégagés, apparaît le problème suivant, visant une détermination de la nature de ces différences. Elles peuvent découler du fait que sur de divers niveaux les dunes se formaient en périodes diverses, d'où l'état différent de transformation des dunes. Un rôle important avait été joué certainement aussi bien par les conditions locales, topographiques, hydrographiques et floristiques que par l'abondance des sources du sable mobile.

C'est Stankowski (1963) qui consacre beaucoup d'attention, dans son ouvrage, à la question de différence en âge entre les dunes appartenant à de divers étages morphologiques. Dans toutes les régions étudiées il trouve qu'il y a des dunes plus anciennes sur hautes terrasses. Tandis qu'au fur et à mesure que l'on descend sur les niveaux de plus en plus bas les dunes deviennent de plus en plus jeunes. Dans les deux premières régions étudiées par lui, c'est-à-dire sur le sandre de Nowy Tomyśl et au pays entre la Warta et la Noteć, les environs de Skwierzyna y compris, les dunes les plus anciennes (provenant du Dryas inférieur ou plus anciennes?) s'observent soit à la surface du sandre, soit sur les plus hautes terrasses — IV^e et IV^ea. Les dunes plus jeunes (dues au Dryas supérieur) ont été notées par lui sur la deuxième terrasse de la Warta. La même régularité s'observe dans le Bassin de Szczecin qui constitue certainement une

Tableau II

Tentative d'une comparaison chronologique des dunes de la Pologne du Sud, Centrale et du Nord

Régions géographiques	Dryas inférieur	Bölling	Dryas moyen	Alleröd	Dryas supérieur	Période préboréale	Période boréale	Période atlantique	Période subboréale	Période subatlantique	
Bassin de Szczecin					?	?					Stankowski (1963)
Région entre la Warta et la Noteć; Czarnków Elżbiecin hautes terrasses basses terrasses	?		+	—	+	+				+	Kozarski (1962) Tobolski (1962) Stankowski (1963) Stankowski (1963)
Gorzewo près de Wągrowiec			+		—	—	—	?			Nowaczyk (1967)
Sandre de Nowy Tomyśl	?		+	—	+			+			Stankowski (1963)
Bassin de Płock			?								Urbaniak (1967)
Pradolina de Varsovie—Berlin: Witów		—	*	—	+	—	+				Dylikowa (1958), Chmielewska, Chmielewski (1960), Wasylkowska (1964) Dylikowa (1960, 1964, 1967), Manikowska (1966)
Katarzynów	+	—	*	—	+	—	+				Dylikowa (1960, 1964, 1967), Manikowska (1966)
Forêt de Kampinos	+	—	+								Kobendzina (1961)
Forêt de Kampinos		—	+	—	+						Wasylikowa (1962)
Bassin de Szczerców: Kozłówka			*	—	+	—					Gawlik (1969), Manikowska (1966)
Vallée de la moyenne Prosna	+	+	+	—	+	+		+	+	+	Tobolski (1966)
Région entre le San et le Łęg	*	*	*	—	+	+	—				Wojtanowicz (1965)

+ couverture éolienne distinguée datée

* phase d'accumulation éolienne principale

? l'âge supposé de la phase d'accumulation éolienne principale des séries éoliennes distinguées

— séries organiques distinguées et datées

des plus jeunes régions dunaires en Pologne, la limite chronologique inférieure des dunes y étant déplacée vers l'Holocène — sur les terrasses IV^e et III^e les dunes ont commencé à se former au Dryas supérieur, tandis que sur la I^e terrasse — aussi tardivement qu'en période préboréale.

Les formes des dunes façonnées sur de divers niveaux sont en un certain rapport, évidemment, avec leur âge. Une activité éolienne relativement intense a eu lieu au Dryas moyen, c'est pourquoi les dunes façonnées alors devraient se caractériser par des traits morphologiques particuliers. À la lumière des études menées en Pologne Centrale on peut avancer l'hypothèse que cette forme-là représentaient les dunes paraboliques. Dans la région dunaire du Bassin de Szczecin (Stankowski, 1963 — carte jointe au texte) le phénomène remarquable sur tous les niveaux est que ce sont les champs de sable qui y sont particulièrement vastes. Quant aux dunes on n'y observe que des formes relativement petites, parmi lesquelles il y a surtout de petits cordons droits ou légèrement arqués. Les dunes paraboliques y sont un phénomène rare. Si l'on s'appuie sur les résultats obtenus en Pologne Centrale (Dylikowa, 1958, 1964) ces caractères pourraient être attribués à une intensité considérablement plus faible des actions éoliennes et à leur efficacité morphologique moindre au Dryas supérieur et ensuite, c'est-à-dire à l'époque de la formation des dunes du Bassin de Szczecin.

Il est certain quand même que les traits morphologiques extérieurs et les caractères structuraux des dunes dépendent largement des conditions locales ce que nous avons souligné déjà dans le chapitre consacré à la succession des phases de développement des formes dunaires. Il y a ici un nombre infini de variétés d'interdépendances entre la forme et la structure des dunes d'une part et les conditions hydrographiques, floristiques et topographiques de l'autre.

Stankowski (1963) remarque, entre autres, une relation caractéristique entre l'existence des dunes paraboliques et la présence de l'argile morainique dans leur substrat. Là où le matériel morainique se trouve tout près de la surface du sol il y a des dunes paraboliques bien développées aussi bien sur les sandres que sur les terrasses de sandre. Il suppose que la faible profondeur de l'argile morainique favorisait le développement de la végétation ce qui, à son tour, entraînait la formation des dunes paraboliques. Il nous semble que l'on pourrait prendre encore en considération la question de conditions variables du développement du pergélisol pendant les phases froides du Tardiglaciaire selon la puissance des sables de sandre et

selon la profondeur sur laquelle il y avait de l'argile morainique. Dans les sandres à des sables profonds le sommet du pergélisol était probablement situé à une profondeur plus importante. C'est pourquoi les sandres ont pu constituer des sources de matériel pour le transport éolien. Là, par contre, où il y avait eu de l'argile morainique tout près de la surface du sol, ou même en surface, le sommet du pergélisol était moins profond. Un tel substrat cimenté par la glace facilitait le transport libre du sable qui n'était empêché que faiblement par la végétation de toundra.

Le problème d'étagement du relief dunaire demande une analyse très détaillée des formes développées sur de divers niveaux à l'intérieur des unités géomorphologiques particulières et une étude séparée de tout complexe dunaire. Suivant une telle voie on pourra arriver progressivement à de certaines généralisations concernant les lois du développement des dunes.

Traduction de T. Kubiak

Bibliographie

- Baulig, H., 1958 — *Studia geomorfologiczne* (Essais de géomorphologie). PWN.
- Cailleux, A., Tricart, J., 1959 — *Initiation à l'étude des sables et des galets*. Paris.
- Chmielewska, M., Chmielewski, W., 1960 — Stratigraphie et chronologie de la dune de Witów, distr. de Łęczyca. *Biuletyn Peryglacjalny*, no. 8.
- Chmielewska, M., Wasylińska, K., 1961 — Witów. *Guide-Book of Excursion C: Łódź-Region, Vth INQUA Congress, Warsaw 1961*.
- Dylik, J., 1967 — The main elements of Upper Pleistocene stratigraphy in Central Poland. *Biuletyn Peryglacjalny*, no. 16.
- Dylikowa, A., 1952 — O metodzie badań strukturalnych w morfologii glacialnej (résumé: De la méthode structurale dans la morphologie glaciaire). *Acta Geogr. Univ. Lodz.*, nr 3.
- Dylikowa, A., 1958 — Próba wyróżnienia faz rozwoju wydym w okolicach Łodzi (résumé: Phases du développement des dunes aux environs de Łódź). *Acta Geogr. Univ. Lodz.*, nr 8.
- Dylikowa, A., 1961a — Katarzynów. *Guide-Book of Excursion C: Łódź-Region, Vth INQUA Congress, Warsaw 1961*.
- Dylikowa, A., 1961b — Structures de pression congélistatique et structures de gonflement par le gel de Katarzynów près de Łódź. *Bull. Soc. Sci. Lettr. Łódź.*, vol. 12, nr 9.
- Dylikowa, A., 1964 — Les dunes de la Pologne Centrale et leur importance pour la stratigraphie du Pléistocène tardif. *Report Vth INQUA Congress, Warsaw 1961*, vol. 4.

- Dylikowa, A., 1968 — Fazy rozwoju wydm w środkowej Polsce w schyłkowym plejstocenie (résumé: Les phases du développement des dunes pendant le Pléistocène tardif). *Folia Quaternaria*, 29.
- Edelman, C. H., 1951 — Niveo-aeolische afzettingen. *Geologie en Mijnbouw*, 13.
- Enquist, F., 1932 — The relation between dune-form and wind-direction. *Geol. Fören. Förhandl.*, vol. 54.
- Galon, R., 1958 — Z problematyki wydm śródlądowych w Polsce (résumé: Sur les dunes continentales en Pologne). Wydmy Śródlądowe Polski. Cz. 1. PWN, Warszawa.
- Gawlik, H., 1969 — Wydmy w Kotlinie Szczercowskiej (résumé: Les dunes éoliennes dans le Bassin de Szczerców). *Prace Geogr. Inst. Geogr. PAN*.
- Hammen, T. van der, Maarleveld, G. C., Vogel, J. C., Zagwijn, W. H., 1967 — Stratigraphy, climatic succession and radio-carbon dating in the last Glacial in the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, 46.
- Hansen, S., 1965 — The Quaternary of Denmark. The Quaternary, vol. 1.
- Kaczorowska-Kobendzina, J., 1926 — Studium geograficzne Puszczy Kampinoskiej (résumé: Etude géographique sur la „lande” de Kampinos). *Przegl. Geogr.*, t. 6.
- Kobendzina, J., 1961 — Próba datowania wydm Puszczy Kampinoskiej (summary: Attempt to date dunes in the Kampinos Primeval Forest). *Przegl. Geogr.*, t. 33.
- Kozarski, S., 1962a — Recesja ostatniego lądolodu z północnej części Wysoczyzny Gnieźnieńskiej (summary: Recession of last ice sheet from northern part of Gniezno Pleistocene Plateau and formation of the ice-marginal valley of the rivers Noteć—Warta). *Prace Komisji Geogr.-Geol. Pozn. Tow. Przyj. Nauk*, t. 2, Poznań.
- Kozarski, S., 1962b — Wydmy w pradolinie Noteci koło Czarnkowa (summary: Dunes in the ice-marginal valley near Czarnków). *Bad. Fizj. n. Polską Zach.*, t. 9.
- Kozarski, S., Tobolski, K., 1963 — Wiek gleby kopalnej w wydmach w Pradolinie Noteci koło Czarnkowa (summary: Age of fossil soil in dunes of the Noteć ice marginal valley near Czarnków). *Bad. Fizj. n. Polską Zach.*, t. 11.
- Krygowski, B., 1961 — Geografia fizyczna Niziny Wielkopolskiej, Cz. I: Geomorfologia (Géographie Physique de la Plaine de Grande Pologne, 1^{re} partie: Géomorphologie). Poznań.
- Lencewicz, S., 1922 — Wydmy śródlądowe Polski (résumé: Les dunes continentales de la Pologne). *Przegl. Geogr.*, t. 2.
- Małkowski, S., 1912 — Wydmy piaszczyste okolic Sadownego (Zsfs.: Die Sanddünen der Gegend von Sadowne, Gouv. Siedlce). *Kosmos*, t. 37.
- Małkowski, S., 1917 — O wydmach piaszczystych okolic Warszawy (résumé: Les dunes anciennes des environs de Varsovie). *Prace Tow. Nauk. Warsz.*, 23.

- Mamakowa, K., 1962 — Roślinność Kotliny Sandomierskiej w późnym glacialu i holocenie (summary: The vegetation of the Basin of Sandomierz in the Late Glacial and Holocene). *Acta Paleobot.*, vol. 3; Cracovie.
- Manikowska, B., 1966 — Gleby młodszego plejstocenu w okolicach Łodzi (résumé: Les sols du Pléistocène supérieur aux environs de Łódź). *Acta Geogr. Lodziensia*, nr 22.
- Manikowska, B., 1969 (sous presse) — Gleba kopalna z interstadiału Allerød na tle stratygrafii utworów fazy zstępującej Würmu w okolicach Łodzi (summary: Fossil soil from Allerød interstadial on the background of the stratigraphy of the waning phase of the Würm in the Łódź Region). *Prace Geogr. Inst. Geogr. PAN* (sous presse).
- Maruszczak, H., 1958 — Wydmy Wyżyny Lubelskiej i obszarów sąsiednich (Les dunes du Plateau de Lublin et des régions voisines). *Wydmy Śródlądowe Polski*, Cz. 2. PWN, Warszawa.
- Maruszczak, H., 1967 — Kierunki wiatrów w okresie akumulacji lessu młodszego we wschodniej części Europy Środkowej (summary: Wind directions during the accumulation of the younger loess in East-Central Europe). *Rocznik Pol. Tow. Geol.*, t. 37.
- Maruszczak, H., Wojtanowicz, J., 1967 — Analiza porównawcza piasków wydmywowych Polski południowo-wschodniej i Węgier (Une analyse comparative des sables dunaires de la Pologne du SE et de l'Hongrie). *Zesz. Nauk. Uniw. A. Mickiewicza: Geografia*, 7.
- Mojski, J. E., 1960 — Schyłek plejstocenu w zachodniej części Kotliny Płockiej (summary: Decline of Pleistocene in Western part of Płock depression, Central Poland). *Kwartalnik Geologiczny*, vol. 4.
- Mycielska-Dowgiałło, E., 1965 — Mutual relation between loess and dune accumulation in Southern Poland. *Geogr. Polonica*, 6.
- Nowaczyk, B., 1967 — Wydmy i eoliczne piaski pokrywowe między Skokami a Mieściskiem (summary: Dunes and eolian cover sands between Skoki and Mieścisko). *Bad. Fizj. n. Polską Zach.*, t. 19.
- Nowicka, I., 1958 — Wydmy na sandrze Brdy (résumé: Les dunes sur le sandre de Brda). *Zeszyty Naukowe Uniw. M. Kopernika w Toruniu: Geografia*, z. 4.
- Pernarowski, L., 1958 — Z badań nad wydmyami Dolnego Śląska (résumé: Les recherches sur les dunes de la Basse Silésie). *Wydmy Śródlądowe Polski*, Cz. 1. PWN, Warszawa.
- Pernarowski, L., 1959 — O procesie sortowania piasków eolicznych na przykładzie wydmy okolic Rzędzowa (summary: Notes on sorting of aeolian sands). *Czas. Geogr.*, t. 30.
- Pilarczyk, L., 1958 — Wydmy międzyrzecza warciańsko-noteckiego (résumé: Les dunes situées entre Warta et Noteć). *Wydmy Śródlądowe Polski*, Cz. 1. PWN, Warszawa.
- Pilarczyk, L., 1962 — O niektórych cechach morfologicznych i wieku wydmy wschodniej części Międzyrzecza Warciańsko-Noteckiego (summary: Remarks on some morphological features and age of dunes of the east part of the Warta—Noteć interfluve). *Bad. Fizj. n. Polską Zach.*, t. 9.

- Stankowski, W., 1959 — Wydma o cechach barchanu z okolicy Czarnkowa (Dune aux caractères d'un barkhane aux environs de Czarnków). *Zeszyty Naukowe Uniw. A. Mickiewicza w Poznaniu: Geografia*, z. 2.
- Stankowski, W., 1959 — Wydma Ciemierowska w Kotlinie Pyzdrowskiej (summary: Ciemierów dune in the Pyzdry basin). *Bad. Fizj. n. Polską Zach.*, t. 5,
- Stankowski, W., 1961 — Z metodyki badań nad wydrami na przykładzie wydmy Basenu Szczecińskiego (summary: Results hitherto obtained in investigation of dunes of Szczecin basin). *Czas. Geogr.*, t. 32.
- Stankowski, W., 1963 — Rzeźba eoliczna Polski północno-zachodniej na podstawie wybranych obszarów (summary: Eolian relief of north-west Poland on the ground of chosen regions). *Prace Komisji Geogr.-Geol., Pozn. Tow. Przyj. Nauk*, t. 4, Poznań.
- Tobolski, K., 1966 — Późnoglacialna i holocenska historia roślinności na obszarze wydmy w dolinie środkowej Prosnicy (summary: The Late-Glacial and Holocene history of vegetation in the dune area of the middle Prosnica valley). *Prace Kom. Biol. Pozn. Tow. Przyj. Nauk*, t. 32, 1, Poznań.
- Twenhofel, W. H., 1950 — Principles of sedimentation. New York.
- Urbaniak, U., 1967 — Wydmy Kotliny Płockiej (summary: Dunes of the Plock Basin). *Prace Geogr. Inst. Geogr. PAN*, 61.
- Wasylukowa, K., 1964 — Roślinność i klimat późnego glacialu w Środkowej Polsce na podstawie badań w Witowie koło Łęczycy (summary: Vegetation and climate of the Late-glacial in Central Poland based on investigations made at Witów near Łęczyca). *Biuletyn Peryglacjalny*, no. 13.
- Wojciechowski, J., 1961 — Essai de l'identification des dépôts quaternaires d'après l'analyse minéralogique sur l'exemple de Katarzynów et de Dąbrówka près de Łódź. *Bull. Soc. Sci. Lettr. Łódź*, vol. 12, nr 11.
- Wojtanowicz, J., 1965 — Wydmy międzyrzecza Sanu i Łęgu (summary: The dunes of the area between the San and Łęg rivers). *Ann. Univ. Mariae Curie-Skłodowska*, sectio B, vol. 20.

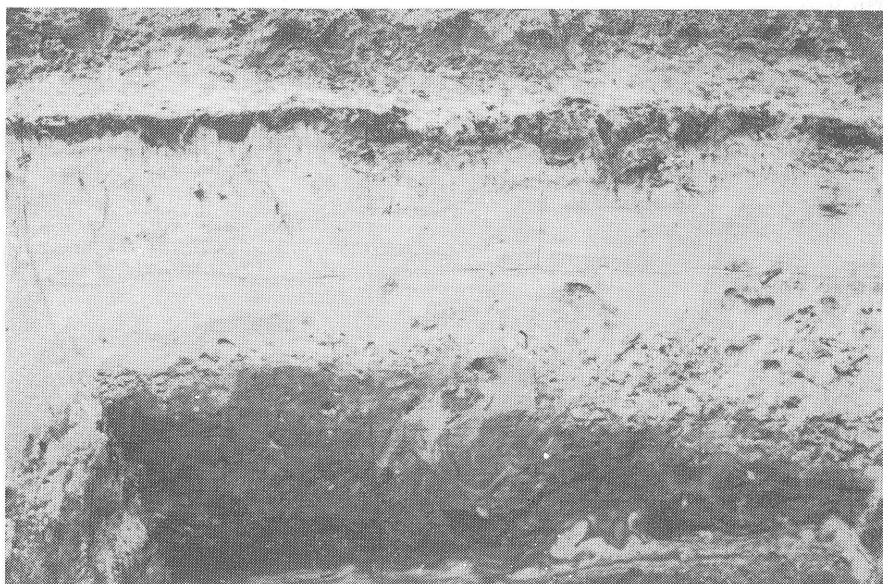


Photo A. Dylikowa, 1960

Pl. 1. Katarzynów aux environs de Łódź. Substratum de la dune; en bas l'argile morainique remaniée par la congélifluxion (phase de croissance du Würm); au sommet de l'argile il y a une couverture de pierres contenant de nombreux cailloux façonnés par le vent (phase de climax du Würm)

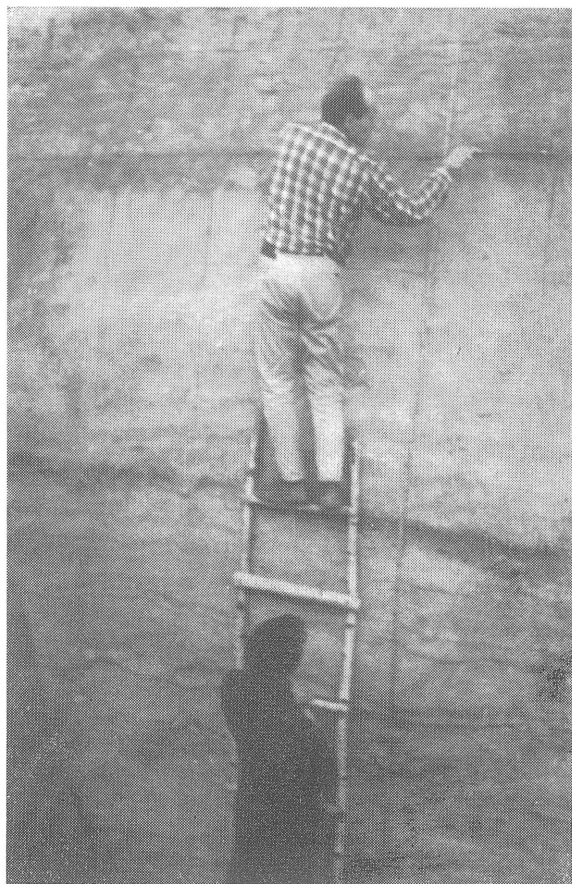


Photo A. Dylkowa, 1960

Pl. 2. Katarzynów aux environs de Łódź. Coupe de la dune présentant trois niveaux des sols fossiles; en bas le sol du Bølling entrelacé par les couches sableuses dues aux actions du vent et du ruissellement qui interrompaient l'évolution du sol; au centre — le sol de l'Allerød, au sommet — le sol holocène (préboréal?). Les niveaux des sols séparent de différentes couvertures dunaires dont l'inférieure est attribuée à la phase initiale (Dryas inférieur), centrale — à la phase d'accumulation éolienne principale (Dryas moyen) et supérieure — à la phase de transformation des dunes (Dryas supérieur). Au-dessous du sol holocène il y a une quatrième couverture correspondante à la phase de destruction des dunes



Photo A. Dylikowa, 1961

Pl. 3. Katarzynów aux environs de Łódź. La couverture sableuse due au ruissellement saisonnier. L'action de mêmes processus intervenait avec une efficacité plus ou moins marquée durant l'accumulation des couvertures respectives de sables

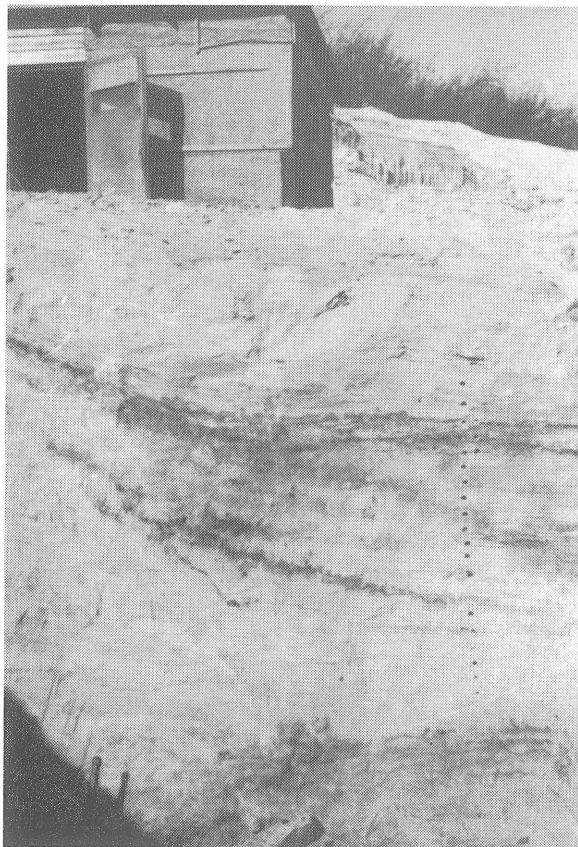


Photo B. Manikowska, 1963

- Pl. 4. Kópice près d'Annopol (Plateau de Lublin). Coupe de la dune présentant, en bas, le sol fossile correspondant probablement au Bølling et recouvrant la plus ancienne série dunaire (Dryas inférieur?) qui repose directement sur le substratum crétacé; le niveau de sol supérieur, remanié par les actions de versant et présentant les traits caractéristiques du sol d'Allerød, sépare les couvertures dunaires du Dryas moyen et du Dryas supérieur; vers le sommet de la dune il y a encore un troisième niveau de sol correspondant à l'Holocène qui n'est pas visible sur la photo