

*André Cailleux**

Québec

RÉPARTITION ET SIGNIFICATION DES DIFFÉRENTS CRITÈRES D'ÉOLISATION PÉRIGLACIAIRE

Parmi les actions et les formes périglaciaires, celles qui sont dues au vent, bien qu'ayant déjà fait l'objet de nombreux et bons travaux, mériteraient d'être étudiées davantage. A cet effet, dans le présent travail, on passera en revue les critères utilisables (voir aussi la Bibliographie) et on indiquera leur répartition et leur fréquence relative, celle-ci souvent différente sous climat froid et sous climat tempéré ou chaud. Ainsi s'efforcera-t-on de dégager la signification de ces critères dans la reconstitution des paysages si variés des régions périglaciaires.

CRITÈRES D'ÉOLISATION PÉRIGLACIAIRE

Les principaux critères et formes d'éolisation peuvent être classés comme suit (tab. I). Ils sont applicables sous tous les climats sauf trois d'entre eux, marqués *P*, propres aux seuls climats périglaciaires ou froids lesquels s'avèrent ainsi mieux pourvus et plus variés que les climats tièdes ou chauds.

1. AIRE DE DÉFLATION

Il y en a de magnifiques, actuelles, en Islande (Gunnarsholt, etc.) et en Antarctique (Victoria Valley près de McMurdo). Au Quaternaire, en Allemagne du Nord-Ouest, où ils ont été découverts par Dücker. Ces aires, plus ou moins planes, parfois étendues sur des kilomètres, sont parsemées de cailloux et de blocs, formant un pavage qui protège le sable du dessous contre un enlèvement par le vent. Aspect et mécanisme sont les mêmes que dans les regs et se-

* Centre d'Etudes Nordiques, Université Laval, Québec 10, Canada.

Tableau I

Principaux critères d'éolisation

- | | |
|----------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| EROSION: | 1. Aire de déflation, reg périglaciaire |
| | 2. Façonnement de roche en place |
| | 3. Façonnement de cailloux (20 à 2000 mm) |
| | 4. Façonnement de grains de sable (0,4 à 1,5 mm)
émuossés-mats et ronds-mats |
| TRANSPORT: | 5. (P) Transport de cailloux (20 à 60 mm) par glissement sur verglas ou glace |
| | 6. Transport de sable et de poussière |
| SEDIMENTATION: | 7. Dune de sable |
| | 8. Manteau et placage éolien |
| | 9. (P) Manteau, placage et dune de sable nivéo-éolien |
| | 10. (P) Remplissage éolien de fentes de contraction par le froid |
| | 11. Dépôt de poussières à granulométrie de loess |

rires du Sahara. A Poste-de-la Baleine (Nouveau-Québec, 55°17'N), les cailloux longs de 45 à 50 mm, de granito-gneiss, ont un indice d'aplatissement de 2,4 et ceux de calcaire de 5,0, valeurs fortes imputables à la gélification. On trouve souvent, l'un près de l'autre, les fragments d'un même caillou, ainsi éclaté par le gel.

Dans la région de McMurdo (Antarctique) l'absence quasi totale de dépôt superficiel de limon paraît tenir à ce que le vent violent balaie toutes les poussières, le sol étant exposé à nu, sans aucune herbe ni autre plante à racines.

2. FAÇONNEMENT DE ROCHE EN PLACE

Il est plus rarement observable. Exemple actuel: En Islande sur limons dépourvus de végétation, microyardangs. Exemples quaternaires: en Scanie (Suède du Sud) et en Hongrie, roche dure bien en place, à surface polie et striée, avec creux et cupules évasés vers l'aval du vent. On peut ainsi reconstituer la direction de celui-ci dans le passé: en Scanie, au Gotiglacial, vent d'Est probablement catabatique, de direction anticyclonique, alors que le vent dominant actuel est de l'Ouest (Cailleux, 1942).

Les rochers en forme de champignon ou de table, souvent attribués au vent, sont dûs en réalité surtout à une désagrégation plus intense de leur pied, imputable à d'autres agents, en particulier à la gélification; leur surface est demeurée râpeuse, le vent a pu contribuer à l'évacuation des débris. Il en va de même des alvéoles et taffonis: ils sont dûs à une désagrégation, surtout mécanique.

3. FAÇONNEMENT DE CAILLOUX

Beaucoup plus souvent observable, c'est un très bon critère. On en trouvera une description très détaillée ailleurs (Milthers, 1907; Cailleux, 1942; Cailleux et Tricart, 1963).

Il faut, à leur sujet, dissiper une légende tenace: la forme en dreikanter n'a rien de caractéristique, tous les auteurs qui ont étudié la question sur le terrain en sont d'accord. Ce qui est caractéristique, c'est d'abord l'état de surface, paraissant brillant au soleil et se résolvant au binoculaire ($\times 40$ à $\times 100$) en une très belle régularisation, avec aplatissement, et très fine ponctuation donnant un aspect mat. Ensuite: arêtes nettes mais non coupantes, en ligne droite ou légèrement arquée, faces planes ou un peu ondulées, cuspules allongées dans le sens du vent,... etc. Exemples actuels: Groenland, Antarctique, Poste-de-la-Baleine dans le Nouveau-Québec, mais ici le façonnement est favorisé par le voisinage immédiat de la mer (mer d'Hudson) où, comme chacun sait, le vent est plus violent. Au Quaternaire: très nombreux espaces sur la bordure de l'inlandsis nord-européen; en Amérique du Nord, cas très typiques, mais paraissant plus rares; en Yakoutie, cailloux magnifiques, aussi beaux que dans l'Ouest de la France.

Les cailloux de moins de 50 mm de long sont souvent façonnés sur toutes leurs faces, ce qui implique des retournements dont le vent lui-même a pu être l'agent. Les cailloux de 100 à 200 mm de long ne sont, en général, façonnés que sur le dessus, ce qui montre que le vent n'a pas réussi à les retourner; c'est le cas pour ceux du Sahara. Mais une exception très remarquable est réalisée dans le Quaternaire de toute la bordure périglaciaire nord-européenne, depuis la France jusqu'à la Pologne au moins; là 80% de ces gros cailloux éolisés le sont sur toutes leurs faces; comme, dans la même bordure, la cryoturbation a été très intense, il est normal de lui attribuer les retournements de ces cailloux. La contre-épreuve s'offre à nous un peu plus au Nord, en Suède centrale (Mora, etc.) et en Estonie (Nõmme près de Tallinn) où les cailloux de ces mêmes dimensions ne sont façonnés que sur le dessus. Or lors de la déglaciation, quand l'inlandsis wurmien s'est enfin retiré de ces régions-là, on sait que le climat était déjà moins sévère, et les cas de cryoturbation, beaucoup plus rares. Ainsi l'étude attentive, statistique, du façonnement éolien des cailloux moyens et gros (plus de 50 mm), peut apporter une contribution intéressante à la reconstitution des climats et des paysages périglaciaires quaternaires.

4. FAÇONNEMENT DE GRAINS DE SABLE ÉMOUSSÉS-MATS ET RONDS-MATS

C'est un critère extrêmement répandu et excellent. Le sable préalablement bien lavé, est observé au binoculaire, en lumière réfléchie, grains isolés sur fond noir. Sur grains de quartz ou de feldspath de 0,4 à 1,5 mm environ, l'arrondi et l'aspect mat identique à celui des cailloux décrits plus haut (2) sont typiques de l'usure par chocs mutuels dans l'air, sous l'effet du vent, tandis que l'usure par frottement doux dans l'eau donne, à la longue, un aspect tout différent, luisant. La reprise éventuelle de grains éolisés anciens (protozoïques, ordoviciens, permiens, triasiques, ... etc.) est possible, et doit être soigneusement discutée en chaque cas, pour éviter toute méprise. Dans le Quaternaire de McMurdo, par exemple, on pourrait penser à une reprise des grains éolisés du grès permo-triasique de Beacon; mais la coexistence, dans le même sable, des quartz ronds-mats avec des grains de dolérite (jurassique) et de basalte (tertiaire et quaternaire) également ronds-mats permet d'affirmer qu'il y a eu aussi une éolisation quaternaire; celle-ci est attestée là de nos jours par bien d'autres critères encore (7, 8, 9, 10 et 11) (Cailleux, 1962).

Quelquefois, un aspect mat dû à une dissolution ultérieure s'observe aussi, mais se distingue du mat dû au vent par plusieurs caractères, notamment par le fait qu'il affecte également les grains de toutes dimensions, même les plus petits (0,2 mm et au-dessous), sur lesquels l'effet du vent est au contraire insensible.

Sur les grains que celui-ci affecte bien (0,4 à 1,5 mm) l'aspect mat est acquis d'abord sur les sommets et arêtes, ensuite seulement sur les faces. La forme, anguleuse à l'origine, change plus lentement, d'où d'abord des émuossés mats, et bien plus tard seulement des vrais ronds-mats. L'indice d'émuosse $2r_1 : L$ médian peut atteindre alors jusqu'à 0,400 et l'indice d'allongement (longueur divisée par largeur) médian peut descendre jusqu'à 1,15 et même 1,10.

La façonnement des grains de sable étant incomparablement plus lent que celui des cailloux, l'aspect rond-mat implique une très longue et forte action du vent. Dans les petites dunes littorales banales, il est nul ou presque, et c'est seulement dans les déserts – que ceux-ci soient arides ou périglaciaires – qu'il est largement répandu. Réciproquement, lors des éventuels remaniements ultérieurs par les glaciers ou par l'eau, l'aspect est conservé très longtemps. Il n'y a donc pas lieu de s'étonner de trouver des grains ronds-mats, en grande abondance, dans des sables à dépôt final marin, par exemple sur les plages de Mauritanie, où ils proviennent du Sahara, ou fluvio-glaciaire, ou glaciaire par exemple dans la bordure périglaciaire quaternaire nord-européenne; là leur façonnement date d'une phase éolienne périglaciaire antérieure.

Exemples actuels: à Post-de-la-Baleine 15% d'émoussés-mats; à Victoria Valley (Antarctique), 80% d'émoussés-mats et de ronds-mats.

Exemples quaternaires: bordure de l'inlandsis nord-européen, de la France à la Pologne, à Moscou et au Timan région de l'Obi moyen, plaines de la Léna, dépression centrale de Kamtchatka 80% de ronds-mats, autant qu'au Sahara. En Amérique du Nord, sur la bordure de l'inlandsis quaternaire, les pourcentages jusqu'ici connus sont plus faibles; moyenne actuelle: 20% dans la Saskatchewan. Mais de plus amples études s'imposent.

Ce critère, sous-estimé bien à tort par de bons auteurs, a été confirmé récemment de manière éclatante par les observations d'Hövermann et de ces collaborateurs en Afrique, par leurs expériences et celles de Horst-Schneider, et enfin par l'observation au microscope électronique à balayage. Son emploi est vivement recommandé.

5. TRANSPORT DE CAILLOUX PAR GLISSEMENT SUR SURFACE GLACÉE

Critère très rarement observable, mais curieux. Il s'agit de cailloux de 20 à 60 mm de long et de 25 à 50 g, rarement plus, isolés ou du moins espacés. Exemples actuels: en Antarctique, sur la surface de la banquise et sur celle de l'inlandsis, en général à moins d'un kilomètre du lieu d'origine. Aux Pays-Bas, en hiver, le vent déplace des cailloux sur le verglas des voies de communication. Au Quaternaire: aux Pays-Bas, sur les collines exclusivement sableuses, rissiennes, du Veluwe, petits cailloux venus de l'Est, à contrepente, et dont le transport ne peut s'expliquer que sur une surface rendue glissante par le verglas (Guilcher et Cailleux, 1950). Autres cas en Bretagne et près de Bordeaux.

Expérimentalement, Lewis a obtenu un transport de cailloux semblables en soufflerie, sur surface verglacée, même à contrepente.

On pensera à ce mode de transport, assez rare mais bien typique, chaque fois qu'on aura à expliquer la présence sporadique, sur des dépôts sableux ou plus fins, ou dans ces dépôts, de quelques petits cailloux insolites, inexplicables autrement.

6. TRANSPORT DE SABLE ET DE POUSSIÈRE

On sait que le sable est transporté surtout par saltation, près du sol (à moins d'un mètre de haut) et les poussières (autour de 40 microns) surtout en suspension, à des hauteurs bien plus grandes. Exemples actuels: au Groenland et en Islande; le nuage de poussière y atteint couramment 400 à 800 mètres de haut. Il s'élève, par exemple, à partir des sandurs.

Ces transports sont très fréquents aussi dans les déserts arides et chauds.

Les nuages de poussière peuvent traverser les mers. Au-dessus de la Mer Rouge et du Golfe Persique, par exemple, leur granulométrie est celle des loess (plus de 45% de la masse entre 10 et 50 microns) (Cailleux, 1961, 1963a).

7. DUNE DE SABLE

Dans les régions périglaciaires accusées, littoral mis à part, les dunes ne sont remarquables que par leur rareté et leur petitesse. Exemple actuel: en Islande, au Geitasandur, où elles n'ont guère qu'un à deux mètres de haut et sont en majeure partie fixées par la végétation; elles font ainsi transition aux monticules qu'en Afrique du Nord on appelle des nebkhlas. Etant donné que dans les mêmes régions périglaciaires abondent les marques d'enlèvement, d'usure et de transport de sable par le vent (1 à 5 ci-dessus), force est bien de conclure que ce sable se dépose sous d'autres formes (8 à 10 ci-dessous).

Les exceptions à la règle précédente sont rares. La plus belle jusqu'ici signalée s'observe en Antarctique dans la région de McMurdo, dans la vallée de Victoria. Les dunes nues atteignant 10 à 15 mètres d'épaisseur, y forment deux champs principaux; l'un d'eux rappelle curieusement le champ de dunes d'Aïn Sefra (Algérie). Différence avec les dunes de pays chauds: présence sporadique de taches d'humidité, explicable par la présence, à faible profondeur, d'un pergélisol ou de neige enfouie dans ce dernier cas, il s'agit d'une dune nivéo-éolienne à rapprocher des manteaux (9 ci-dessous).

Sous climat moins rigoureux, à la limite du périglaciaire et du frais, s'édifient souvent des dunes paraboliques ou à caoudeyres, en partie fixées par la végétation. Exemple actuel: Poste-de-la-Baleine. Exemples quaternaires: dunes édifiées à 3 ou 4 reprises, entre 15000 BC et 1500 BC, en Allemagne, Pologne, Canada, sur des espaces sableux (fluviaires, fluvio-glaciaires, glacio-lacustres... etc.) qui offraient une prédisposition favorable à l'action du vent.

Dans les dunes périglaciaires de Hongrie, au Sud de Budapest, s'observent des lits de granulométrie plus grossière que le reste. La différence est sensible à l'oeil. Pourrait-elle fournir un critère des dunes périglaciaires, par opposition à celles de climat tempéré ou chaud, à granulométrie plus homogène? La question est posée, comme l'est celle de l'interaction de la neige et du sable, lors de l'enlèvement puis du dépôt, sur laquelle nous reviendrons plus loin (9 ci-dessous).

8. MANTEAU ET PLACAGE ÉOLIEN

Ils sont, dans les régions périglaciaires, beaucoup plus fréquents que les dunes. Leur épaisseur va de 0,1 à 2 mètres, rarement plus. Leur surface est plane ou légèrement ondulée. On parlera de placages s'ils ont moins de 100

mètres de long, de manteaux s'ils en ont davantage. Ils peuvent atteindre plusieurs kilomètres.

Exemples actuels: à l'Eeq (Groenland) sur croupes, placages de limon épais de 10 à 20 centimètres, couverts de végétation. A Poste-de-la-Baleine, près des dunes littorales, placages de sable sur roc ou sur terrasses estuariennes, portant de l'herbe ou de la taïga claire à Lichens.

Exemples quaternaires: en Charente (France de l'Ouest) manteaux de sable à 90% de grains ronds-mats, passant vers l'Est (vers l'intérieur des terres) par transitions insensibles à des sables limoneux, puis à des limons déposés par le vent. Ces derniers sont assimilables à des loess. Au Danemark, le *Flyvesand*, et en Allemagne, beaucoup de *Decksand* sont des manteaux soit éoliens, soit nivéo-éoliens.

9. MANTEAUX ET PLACAGE DE SABLE NIVÉO-ÉOLIEN

Il en existe de deux sortes: annuels et pérennes. Exemples actuels: dans les dunes près de Varsovie, en hiver, dépôt en lits alternants de neige et de sable éolien décrit par Madame Kobendzina; l'été venu, la neige fond (nivéo-éolien annuel). Au Groenland, dépôts semblables signalés par Wegmann. A Poste-de-la-Baleine, la neige est par endroits recouverte de sable apporté par le vent. Au printemps, on constate qu'elle est transformée en névé à grains de glace gros comme des petits pois, et même en glace compacte. L'épaisseur va de 10 à 70 centimètres, parfois plus. La couverture de sable est épaisse de 1 à 30 centimètres; puis la glace fond, et le sable superficiel prend de ce fait des formes curieuses transitoires, sortes de taupinières crevassées là où il a plus de 2 à 3 centimètres d'épaisseur, petits cônes ou pyramides pointus là où il est plus mince. Les uns et les autres peu à peu s'affaissent. L'aspect qui en résulte sur la stratification du sable, après la fonte totale, en été, est à l'étude depuis juin 1969. Le nivéo-éolien ici encore est annuel.

En Antarctique, à McMurdo, dans la vallée de Victoria, le nivéo-éolien forme des manteaux étendus. Les coupes naturelles, très rares, montrent une stratification en lits alternants, d'épaisseur inégale, de neige et de sable. En été, la couche supérieure, épaisse de 20 cm environ, est uniquement sableuse, les éventuels lits de neige qu'elle avait pu comporter ayant fondu. Plus bas, la neige est tassée, recristallisée; elle peut avoir la structure en petits pois. Quant au sable, en surface il porte des rides éoliennes typiques (intervalle de crête à crête proche de 7 cm pour les unes, à crête accusée, et de 80 à 90 cm pour les autres, à crête en bombement doux) et il est souvent affecté, tous les 10 mètres environ, de fentes de contraction par le froid, attestant que le manteau est pérenne (c'est-à-dire qu'il est âgé d'au moins plusieurs années et peut être de plusieurs siècles). Fait fondamental, les différents lits de sable

ont ici des granulométries différentes. Si le climat devenait plus chaud, neige et glace fondraient et il resterait un manteau de sable stratifié; du fait des rides et des inégalités d'épaisseur présentées, d'un point à l'autre, par un même lit, la stratification finale du sable serait onduleuse.

Exemple quaternaire: aux Pays-Bas, en Belgique et en France, des manteaux de sable stratifié présentant les caractéristiques précédentes s'expliquent au mieux comme d'origine nivéo-éolienne.

La distinction entre manteaux ou placages nivéo-éoliens, et simplement éoliens (8) (ceux où il n'y a jamais eu interstratification de neige) exigera des études plus poussées (granulométrie, stratification, etc) sur des dépôts actuels, études très souhaitables étant donné l'enjeu, à savoir les conclusions paléoclimatiques qu'on pourra en tirer pour les formes et dépôts anciens.

10. REMPLISSAGE ÉOLIEN DE FENTES DE CONTRACTION PAR LE FROID

On sait par les travaux de von Bunge (1880) en Sibérie, et de Péwé (1959) en Antarctique que les fentes, provoquées par la contraction des sols gel, sous l'effet des grands froids hivernaux, et qui s'élargissent d'année en année, surtout vers le haut, en prenant souvent la forme de coins, peuvent être remplies, à l'origine soit de matériel éboulé des parois, soit de trois autres manières:

(1) S'il y a de la neige au-dessus, au printemps celle-ci fond, l'eau de fonte s'insinue dans la fente et gèle au contact des parois plus froides. Ainsi se forment les classiques *coins de glace*, ou *filons de glace*. Si plus tard le climat se réchauffe suffisamment, la glace fond et le vide est comblé par du matériel minéral provenant des parois ou apporté du voisinage; ainsi se forment des *pseudomorphoses*.

(2) S'il n'y a pas de neige au-dessus de la fente, celle-ci est comblée par du matériel transporté par le vent, et qui y tombe et s'y trouve piégé. Ainsi se forment les fentes à remplissage de sable actuelles de l'Antarctique et celles qui avaient été décrites dès 1942 (Bastin) des environs de Bordeaux (France du Sud-Ouest). Dans les deux cas cités, le sable est à grains ronds ou mats émous sés-mats bien typiques de l'usure par le vent.

(3) Enfin, si en un même lieu, les deux éventualités précédentes alternent suivant les années ou les groupes d'années, on a des fentes à remplissage mixte de glace et de sable, en lits plus ou moins verticaux et parallèles, connues en Antarctique.

Les fentes à remplissage initial de sable peuvent voisiner avec des fentes à remplissage initial de glace à assez courte distance. Exemple: en Antarctique. Leur intérêt est considérable, en ce qu'elles impliquent l'existence d'endroits déneigés, or ceux-ci sont plus étendus dans les régions à précipitations assez faibles.

bles, pouvant descendre jusqu'à 150 mm par an dans la région de McMurdo où Péwé les a observés.

Il est curieux de constater que la région de Bordeaux et aussi celle de Paris, ont connu au Quaternaire des climats à précipitations approchantes, ou en tout cas, plus faibles qu'aujourd'hui.

Au total, critère extrêmement parlant, à utiliser au maximum quand on a la chance de la rencontrer.

11. DÉPÔT DE POUSSIÈRES À GRANULOMÉTRIE DE LOESS

Je serai bref sur ce sujet, qui a donné lieu à tant de controverses. Les poussières transportées par le vent, recueillies entre 2 et 10 mètres de haut, ont la granulométrie des loess, avec une médiane de 15 à 40 microns. Quant à leur chute, trois cas principaux sont possibles:

(1) Elles tombent sur le roc nu ou le sol nu. La prochaine tempête les balaiera plus loin. C'est ce qui arrive, nous l'avons vu, en Antarctique sur la terre ferme, faute de couvert végétal.

(2) Elles tombent dans la mer, ou sur la banquise d'abord, donc tôt ou tard dans la mer. Exemple actuel: en Antarctique, dans le détroit de McMurdo, par 600 mètres de profondeur, la vase marine a la granulométrie d'un loess; il s'y ajoute des spicules d'éponges et débris d'autres organismes. Une variante est la chute dans un lac. Exemple quaternaire: loess d'infusion de Hongrie.

(3) Elles tombent sur une région à couvert végétal, en fait sur une formation herbacée. Les plantes les protègent d'un enlèvement ultérieur par le vent, de sorte que peu à peu elles s'accumulent. Ainsi se forment des loess et limons éoliens, qui recouvrent la région comme d'un manteau, épousant les ondulations du terrain. Exemple actuel: en Islande, où le dépôt éolien, à l'air libre, est attesté par l'interstratification, dans les limons, de lits cendres volcaniques, identifiés et datés, certains d'âge historique, ce qui a permis à Sigurdur Thorarinsson de mesurer la vitesse d'accumulation de ces limons éoliens.

Exemples quaternaires: Etats-Unis, Hongrie, Europe Occidentale.

Les loess et limons éoliens peuvent être ensuite remaniés par l'eau (exemple actuel en Chine), par solifluxion (exemples quaternaires en Allemagne du Sud)...etc.

RÉPARTITION DES CRITÈRES D'ÉOLISATION PÉRIGLACIAIRE DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS

1. DANS L'ESPACE

A la surface du Globe terrestre, les diverses éolisations que nous venons de passer en revue peuvent être actives dans trois sortes principales de conditions: (1) sous climat périglaciaire ou froid, (2) sous climat aride ou semi-

-aride, (3) au bord de la mer ou des grands lacs, plus rarement de grands fleuves, où le vent est particulièrement fort.

Le seul caractère commun à ces trois cas, et il est fondamental, est l'absence de couvert végétal ou sa précarité. Une circonstance favorable adjuvante est la présence de vastes dépôts sableux fluvio-glaciaires, fluviatiles, littoraux, ou encore éoliens datant d'une phase périglaciaire antérieure; les dunes juxtapo-fluviales d'Allemagne et de Pologne en sont un exemple classique.

Sous climat froid, en allant du climat périglaciaire le plus sévère au moins sévère puis au climat frais, s'observe une certaine gradation: D'abord prédominance de la déflation (1), avec façonnement de roche en place (2) et de cailloux (3) et remplissage de fentes de contraction. Puis prédomine de l'accumulation de sable, surtout en manteaux et placages (8) éventuellement nivéo-éoliens (9), moins souvent en dunes (7). Et enfin plus loin accumulation de loess et de limons sur terre ferme (11,8). Aussi bien en conditions périglaciaires qu'en conditions arides, les grains de sable ronds-mats (4) sont plus abondants près des aires de déflation (1) et dans les manteaux (8, 9) ou petites dunes que dans les grandes dunes épaisses, probablement pour la simple raison qu'un grain a d'autant plus de chances d'être transporté et donc cogné et façonné, qu'il se trouvait, avant le départ, plus près de la surface du terrain. Les grains enfouis des grandes dunes ont de telles chances beaucoup plus rarement (J. Tricart).

Le Portugal littoral est l'une des rares régions du Globe où, lors des périodes froides quaternaires, l'action du vent a été plus forte (sables de la Gandara) que celle des cryoturbations. L'explication la plus probable est dans le climat maritime: une moyenne annuelle de température proche de 0° interdisait un sol gelé permanent; avec une différence entre les moyennes de janvier et celle de juillet supposée égale à 16° comme de nos jours, les hivers n'avaient rien d'excèsif (janvier: -8°), mais les étés étaient frais (+8°), c'est-à-dire moins que le minimum nécessaire à la forêt (+10 à +11°), au moins à certaines époques, d'où sol herbeux assez facilement attaqué par le vent.

Même si on met à part ce cas jusqu'ici assez exceptionnel, on constate qu'au Quaternaire, les actions éoliennes périglaciaires se sont exercées, lors des phases froides qui entraînaient la végétation, loin au sud de la limite des *inlandsis*. En France, on a des fentes à remplissage de sable éolien, de magnifiques manteaux de sable et d'admirables cailloux éolisés jusqu'au sud de Bordeaux, à près de 1000 kilomètres du plus proche front d'*inlandsis*. Bien entendu, la largeur de cette bordure périglaciaire a pu varier suivant les conditions propres à chaque continent ou à chaque grande portion de continent. Ainsi en Amérique du Nord, les actions éoliennes périglaciaires quaternaires, à en juger par les grains de sables ronds-et-mats ont été moins intenses qu'en Europe (4 ci-dessus) et, à en juger par les cailloux éolisés et fentes à rem-

plissage éolien jusqu'ici décrites, elles n'ont probablement pas beaucoup dépassé les limites extrêmes de la glaciation inlandsisienne; il est vrai que celle-ci a atteint là son record de basse latitude: 38° N dans l'Illinois.

La Sibérie occidentale présentera un champ d'étude passionnant. Les grains ronds-mats, fréquents sur le cours inférieur de l'Yénissei, et le cours moyen de l'Ob seraient difficilement rattachables aux actions arides bien connues du Turkestan. Nous y verrions bien plutôt la marque d'actions périglaciaires. Mais, où tracer la limite des effets du froid, au Nord, et de l'aridité, au Sud? La question est ouverte.

L'action périglaciaire paraît bien en cause pour expliquer les éolisations si belles du bassin de la Léna, (cailloux façonnés, grains de sable, etc) et celles plus sporadiques, comme il arrive toujours en pays de montagne, de la Transbaïkalie et de la dépression centrale du Kamtchatka.

DANS LE TEMPS

C'est surtout en Europe occidentale et septentrionale, jusques et y compris la Pologne et les deux rives de la Baltique, qu'une chronologie et une sériation dans les actions éoliennes périglaciaires ont pu être établies.

Les grains ronds-mats propres apparaissent dès les premiers dépôts glaciaires, parfois même dans le matériel périglaciaire sous-jacent (Allemagne du Nord, Saxe, Varsovie), ce qui montre bien que le climat froid a précédé l'arrivée de l'inlandsis en ces lieux; de même dans la région des Pays-Bas, Belgique, Angleterre, dans les séries marines classiques de la Mer du Nord, des grains ronds-mats apparaissent dès l'Icénien (=Quaternaire inférieur), en même temps que les signes de refroidissement de la faune marine et la flore terrestre.

Lors des Pléniglaciaires, au moins des mieux datés, ceux du Riss et du Wurm, les actions éoliennes périglaciaires ont été intenses, notamment dans toute la bordure de l'Inlandsis nord-européen, depuis l'Angleterre et la France (et même depuis le Portugal) jusqu'à Varsovie, à Moscou et au Timan.

A partir du Tardiglaciaire, les processus s'atténuent; au Gotiglacial, quand l'inlandsis occupe encore presque tout le Sud de la Suède, on a encore, sur sa frange, de gros cailloux façonnés par le vent sur toutes leurs faces donc retournés par la cryoturbation, dont on trouve d'ailleurs d'autres signes (fente en coin, mares de pingos, etc.); même tableau en Lithuanie, près de Kaunas, Siauliai et Wilno. Plus tard, on ne trouve plus guère que des cailloux façonnés sur le dessus, indice de l'absence de cryoturbation, ou de sa rareté: ainsi sur le sandur de Nômme, au Sud de Tallinn, ou encore à Mora et à Brattfors-heden, en Suède centrale; lors de la poussée froide de la Salpausselkä, les cas de cryoturbation sont devenus très rares (quelques fentes en coin spora-

diques). En même temps, les manteaux éoliens, si abondants en Wurm final, ont cédé le pas aux dunes. Trois ou quatre phases d'activité de celles-ci, bien étudiées et datées entre autres en Pologne, paraissent bien marquer les dernières poussées de froid du Tardiglaciaire et du Postglaciaire. Ces dunes, souvent paraboliques ou à caoudeyres, affectent surtout les vastes espaces sableux préexistants; il y a là un exemple de prédestination lithologique évident. Au Canada, on a eu de même, après le Würm (Wisconsin) final, plusieurs phases d'édification de dunes. Là, comme en Europe, elles sont aujourd'hui fixées (sauf réjuvénation par intervention intempestive de l'homme); leur datation est en cours d'étude. On peut espérer qu'en tous ces pays, en Union Soviétique et ailleurs, ces épisodes dunaires apporteront une contribution intéressante à la connaissance du Quaternaire final (fin du Pléistocène et Holocène) en particulier à celle de ses oscillations climatiques.

CONCLUSION

Les critères d'action du vent périglaciaire sont nombreux et variés. Ils nous montrent que, sous climat froid, entravant la végétation, l'action du vent est intense; aujourd'hui, ces effets s'observent dans les régions polaires et dans quelques très hautes montagnes. Au Quaternaire lors des périodes froides, ils se sont étendus jusque dans les plaines des régions aujourd'hui tempérées, où ils ont contribué à modeler le relief et les dépôts. Leur étude apporte de très utiles précisions sur les paysages et les climats du Quaternaire, et sur leur histoire.

Bibliographie

- Bastin, A. et Cailleux, A., 1941 – Action du vent et du gel au Quaternaire dans la région bordelaise. *Bull. Soc. Géol. France*, 5 s., t. 2; p. 259–266, 5 fig., 1 pl.
- Boyé, M., 1950 – Glaciaire et périglaciaire de l'Ata Sund Nord-oriental, Groenland. 176 p., 3 pl. Hermann édit., Paris.
- Cailleux, A., 1942 – Les actions éoliennes périglaciaires. *Mém. Soc. Géol. France* N.S., t. 21, f. 1–2, No. 46; p. 1–176, 27 fig., 6 pl.
- Cailleux, A., 1953 – Les loess et limons éoliens de France. *Bull. Serv. Carte Géol. France*, No. 240, t. 51; p. 1–24, 3 fig., 1 pl.
- Cailleux, A., 1961 – Sur une poussière transportée par le vent en Mer Rouge. *C. R. Ac. Sc.*, t. 252; p. 905–907, Paris.
- Cailleux, A., 1962 – Etudes de géologie au Détroit de Mc Murdo (Antarctique), *C.N.F.R.A., Terres Austr. et Ant. Franç.*, V. 1; 41 p., 28 fig., Paris.

- Cailleux, A., 1963 – Géologie de l'Antarctique. 210 p. 24 fig., Constans éd., Paris.
- Cailleux, A., 1963a – Sur une poussière transportée par le vent dans le Golfe Persique. *C. R. Ac. Sc.*, t. 256; p. 2439–2440, Paris.
- Cailleux, A., 1968 – Periglacial of Mc Murdo Strait (Antarctica) *Biul. Peryglacjalny*, no. 17; p. 57–90, 12 pl.
- Cailleux, A., et Tricart, J., 1963 – Initiation à l'étude des sables et des galets. 3 vol. 369–194–202 p., 72 fig., Constans éd., Paris.
- Guilcher, A., et Cailleux, A., 1950 – Reliefs et formations quaternaires du Centre-Est des Pays-Bas. *Rev. Géom. Dyn.*, t. 1, No. 3; p. 128–143, 7 fig., Paris.
- Milthers, V., 1907 – Sandslebne Stens Form og Dannelse. *Medd. Dansk. Geol. Förs.*, B. 3, 13–17; p. 33–60, 2 fig., 5 pl., Kobenhavn.
- Péwé, T. L., 1959 – Sand-wedge polygons (tesselations) in the McMurdo Sound region, Antarctica. A progress report. *Am. Jour. Sci.*, vol. 257; p. 545–552.