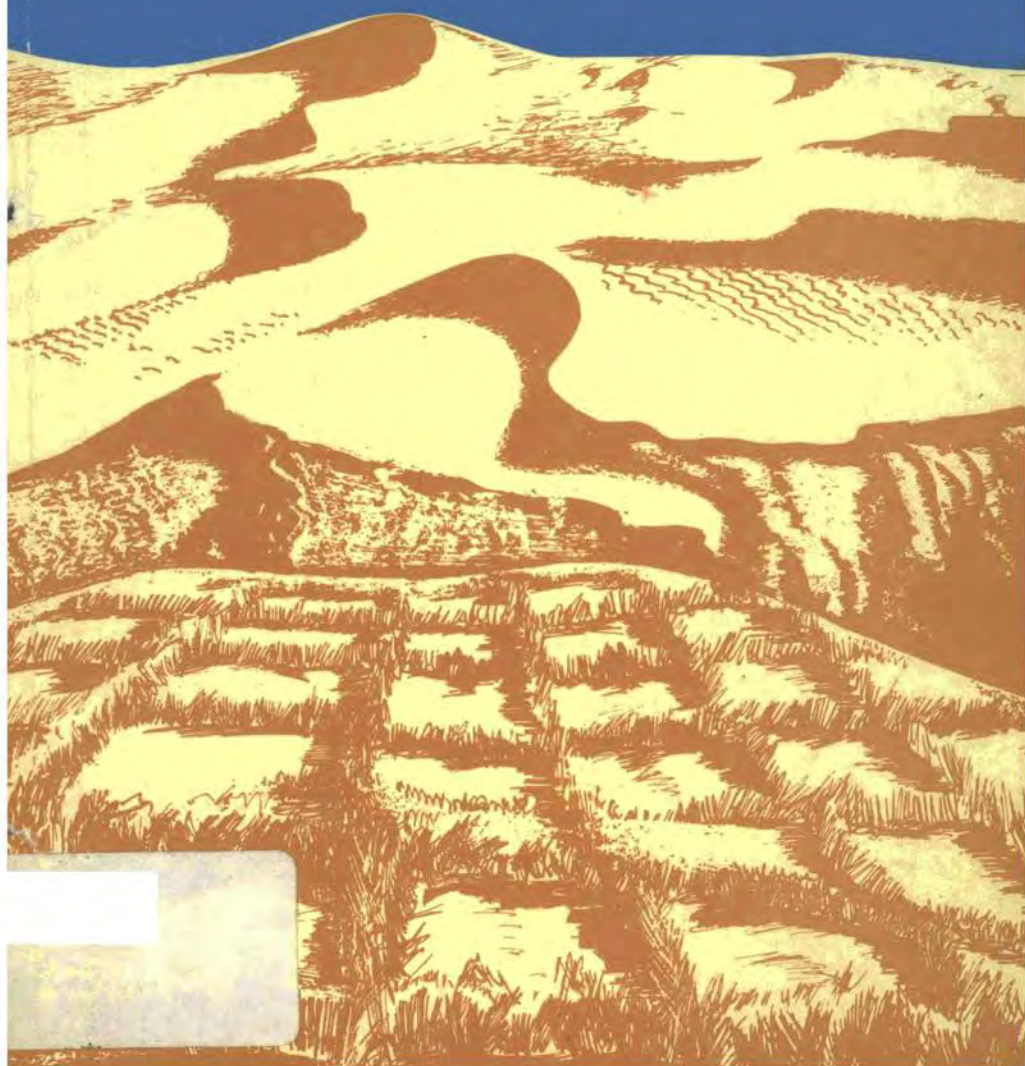




PROGRAMME DE L'ONU POUR L'ENVIRONNEMENT (PNUE)
COMMISSION DE L'U.R.S.S. POUR LE PNUE

PRINCIPES ET METHODES DE FIXATION DES SABLES MOUVANTS



PROGRAMME DE L'ONU POUR L'ENVIRONNEMENT (PNUE)
COMMISSION DE L'U.R.S.S. POUR LE PNUE

PRINCIPES ET METHODES DE FIXATION DES SABLES MOUVANTS

La rédaction de A.G. BABAIEV, membre suppléant
de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.

CENTRE DES PROJETS INTERNATIONAUX DU GKNT

Moscou 1986

© PNUE

Tous droits réservés. Aucune partie de cette publication ne pourra être reproduite, mise en mémoire ou transmise sous quelque forme que ce soit ou par des moyens électroniques, électrostatiques, mécaniques, par photocopie, enregistrement, bande magnétique ou autres procédés, sans l'autorisation écrite des dépositaires du copyright.

La formulation et la présentation du contenu de cette publication ne constituent pas l'expression d'une quelconque opinion du PNUE quant au statut juridique d'un pays, territoire, ville ou zone ou de ses autorisés, ni la délimitation de ses frontières ou limites.

Moscou 1986

Composé pour l'édition par le Centre des projets internationaux du GKNT dans le cadre du projet PNUE/URSS «Cours de formation sur la lutte contre la désertification».

PREFACE

Le contrôle des sables mouvants fait partie intégrante du problème de la désertification: en envahissant les terres agricoles, irriguées ou non, les établissements humains, les chemins de fer, les routes et d'autres ouvrages, ils causent des dommages sérieux à la population et désorganisent la production.

Selon le Programme de l'ONU pour l'environnement (PNUE), la superficie totale des terres exposées à la désertification fait 48,3 millions de km² (36,3 % de la surface de la terre ferme du globe).

La superficie des déserts sableux du monde — source de sables mouvants — est estimée à 1/3 ou à 1/2 de la surface totale des 14,01 millions de km² de vrais déserts.

En Union Soviétique, les sables occupent 1 million de km², soit plus de 4 % de son territoire. Les sables mouvants couvrent 12 à 15 % de la superficie totale des sables. Rien que dans la RSS de Turkménie, la superficie des sables s'élève à 257 mille km² dont 40 mille km² de sables mouvants et semi-mouvants. Il s'agit notamment du Djilli-Koum, des sables Primorski, de la périphérie nord-est de la dépression de Transoungouz, du massif de Yaskhan, de certains secteurs attenants à l'Amoudaria, etc. Des sables mouvants sont signalés en Ouzbékistan, au Kazakhstan, dans le bassin inférieur de la Volga.

Les sables mouvants des déserts sableux sont également considérés comme le résultat des processus éoliens dus aux vents forts, à la faible pluviométrie, à la pauvreté de la végétation et à la fréquence des dépôts quaternaires meubles. La fragilité et l'instabilité des paysages font le trait caractéristique des déserts sableux. Les sables mouvants représentent une forme dynamique du relief. Leur déplacement est fonction de la force et de la direction des vents dominants et de leur granulométrie.

Aujourd'hui, quand nous assistons à une intense exploitation industrielle et agricole des richesses naturelles des déserts, dans certains endroits, l'équilibre dynamique des processus se déplace: la déflation des sables l'emporte sur la fixation de ceux-ci, tout comme sur le développement de la végétation. A la place des formes de relief fixes surgissent des formes mouvantes classiques. Avec le temps, les paysages

séculaires des déserts, des semi-déserts et des steppes arides, avec une végétation relativement abondante et fixant les couches supérieures des sables et des sols argilo-sableux, se transforment en paysages de sables mouvants, le rétablissement des écosystèmes perturbés est particulièrement lent dans les régions arides.

Aux siècles précédents, la formation de massifs de sables mouvants s'expliquait par la surexploitation des terrains de sable couverts de végétation pour le pâturage et la production de bois de feu. Par conséquent, les sables mouvants apparaissaient surtout autour des puits ou aux abords des oasis. Plus tard, avec la construction de chemins de fer et de routes dans les déserts et les semi-déserts, ils ont fait leur apparition à proximité des stations ferroviaires. Ces dernières années, de grandes surfaces sableuses embroussaillées dans les zones arides ont été endommagées par la construction de pipe-lines, d'entreprises industrielles et d'agglomérations environnantes.

La végétation arbustive des déserts et des semi-déserts a beaucoup souffert du transport du gros matériel de forage dans les régions désertiques faisant objet de travaux de forage, de prospection ou d'exploitation des gisements de pétrole et de gaz.

Il en résulte que dans toutes les régions arides du monde, l'homme doit dépenser beaucoup d'efforts pour faire face à la menace d'invasion par les sables mouvants.

A. Balba (1982) a déterminé, en s'appuyant sur la carte mondiale de la désertification établie par les PNUE/FAO/UNESCO, que près de 577 millions d'ha sont exposés à la désertification par suite du mouvement des sables, dont 319 millions d'ha en Afrique, 116 millions d'ha en Asie, 137 millions d'ha en Australie et 4,6 millions d'ha en Amérique du Sud. Le territoire particulièrement exposé aux effets de la désertification du fait des sables mouvants fait 44 millions d'ha environ, dont 43,5 millions d'ha en Afrique et 0,5 million d'ha en Asie. Dans les régions arides, cette superficie s'élève à 15 millions d'ha; les autres 29 millions d'ha sont associés aux régions semi-arides, essentiellement en Afrique.

D'après les experts du PNUE, au cours de ces 50 dernières années, le Sahara a englouti, dans la région du Sahel, 65 000 km² de terres fertiles; le désert de Thar en Asie avançait dans cette période d'un kilomètre par an; l'Inde et le Pakistan ont ainsi perdu 130 km² de terres labourables. Au Soudan, la limite de la zone des déserts se déplaçait vers le sud à raison de 6 à 7 km par an. Tous les ans, les vents emportent près de 60 millions de tonnes de couche supérieure de sol fertile. En Somalie, les dunes de sable se déplaçant à une vitesse de 15 m par an envahissent des routes et des champs, ensevelissent des villages et des lignes de communication.

Du fait de la gravité du problème pour beaucoup de pays du monde, le contrôle des sables mouvants a été fait figurer dans le Plan d'actions pour la lutte contre la désertification: «Entretien et sauvegarde la végétation naturelle existante, prendre des mesures spéciales pour ré-

tablir et entretenir la couverture végétale sur les secteurs dénudés afin de protéger les sols végétaux et fixer les sables mouvants».

Pour appliquer cette recommandation, il est souhaitable de réaliser des actions nationales prioritaires dans les régions où des établissements humains, des communications, des terres agricoles et d'autres ouvrages se trouvent menacés.

Afin de contrôler les ensablements et de fixer les sables mouvants, il s'agit notamment:

- d'étudier les vitesses de déplacement des sables, des poussières et des dunes; de mettre en évidence le régime éolien effectif ainsi que les sources de sable et de poussière;

- de contenir le déplacement des sables par voie de fixation des surfaces sableuses, de construction de clôtures, de rétablissement de la couverture végétale dans les zones servant de sources de sables, ainsi que d'aménager des périmètres de protection;

- de fixer les dunes de sables en utilisant paillis et paillasons, agents chimiques ou bitumineux et autres produits économiquement rentables, en sélectionnant des plantes susceptibles de fixer les sables, en modifiant les formes des dunes et en détruisant, le cas échéant, les versants raides;

- de contrôler l'exploitation des terres dans les régions à dunes fixées afin de prévenir la déstabilisation de celles-ci.

Ainsi, les différents procédés utilisés pour contrôler les sables mouvants pourraient être subdivisés en moyens mécaniques, biologiques et physico-chimiques.

Pour stabiliser les surfaces sableuses, tout un ensemble de mesures d'amélioration a été mis au point en Union Soviétique: fixation des sables mouvants à l'aide de protections mécaniques, mise en place de films de protection en bitume, pétrole brut, matières polymères, etc., boisement des sables.

L'élaboration de méthodes de protection des ouvrages d'intérêt économique contre l'ensablement et l'érosion fait l'objet des activités de nombreux établissements de recherche comme: l'Institut des déserts de l'Académie des Sciences de la RSS de Turkménie (Achkhabad), l'Institut de recherche en sylviculture de l'Asie Centrale (Tachkent), l'Institut national de recherche en amélioration agrosylvicole des terres (Volgograd), l'Institut des ingénieurs des chemins de fer (Tachkent), etc. Les programmes de leurs travaux prévoient l'étude des principes théoriques de la fixation de sables, des causes de la formation et de la propagation des sables mouvants dans le pays, la cartographie des types de sables; l'élaboration de schémas adaptés pour l'implantation et la protection des ouvrages d'intérêt économique dans les déserts sableux; l'étude des particularités écologiques des plantes arénicoles, du comportement des revêtements chimiques; la recherche de nouvelles substances fixatrices, le perfectionnement de la technologie des travaux de fixation des sables et la mécanisation de la pose des protections, des semilles et de la plantation des psammophytes.

En coordonnant les efforts de mise au point de méthodes efficaces de fixation des sables mouvants, en réalisant de façon planifiée les travaux de fixation sur de grandes surfaces, il a été possible non seulement de réduire considérablement les foyers de formation des sables mouvants, mais aussi d'en faire souvent des domaines fertiles.

Tout cela a permis à la délégation soviétique de proposer à la Conférence des Nations Unies sur la désertification (Nairobi, 1977) d'organiser en Union Soviétique des cours de formation internationaux destinés aux spécialistes diplômés sur le problème de la fixation des sables mouvants. Cette proposition a été incluse au Plan d'actions de la conférence (recommandation No. 23).

Depuis 1978, ces cours fonctionnent régulièrement dans notre pays. Le programme d'enseignement a requis la rédaction de manuels et de guides relatifs à la fixation des sables mouvants.

En 1980, les chercheurs de l'Institut des déserts de l'Académie des Sciences de la RSS de Turkménie ont rédigé et publié le manuel: «La fixation et le boisement des sables mouvants des déserts de l'Union Soviétique».

Le présent manuel récapitule et analyse une vaste information en matière des sables mouvants, et les auteurs espèrent qu'il contribuera à la solution de ce problème de caractère global.

1. PARTICULARITES ECOPHYSIOGRAPHIQUES DES DESERTS DU MONDE

1.1. DESERTS SABLEUX DU MONDE

On appelle déserts les vastes zones naturelles au climat chaud et sec, à une pluviométrie pauvre et à une végétation assez clairsemée. Les déserts se caractérisent non seulement par une pluviométrie inférieure à 250 mm, mais aussi par une forte irrégularité saisonnière et une grande instabilité des précipitations. Le taux d'évaporation dépasse de loin le taux des précipitations. Les déserts n'ont pas d'écoulement de surface permanent, sont traversés de lits secs de cours d'eau temporaires et présentent une salinité élevée des sols [Babaiev, Freikine, 1977].

Sur la nouvelle carte de répartition mondiale des zones arides, publiée par les PNUE/FAO/UNESCO/OMM (World Map of Desertification, 1977) ces zones sont caractérisées par un indice d'aridité (rapport entre le volume annuel des précipitations et celui de l'évaporation potentielle) se trouvant entre 0,20 et 0,03. Cet indice pour les zones extra-arides, autrement dit déserts, est inférieur à 0,03. En d'autres termes, l'évaporation y dépasse de plus de 33 fois le volume des précipitations évaporables.

Selon les experts du PNUE, les déserts véritables (zones extra-arides et arides) s'étendent sur une surface de plus de 28 millions de km² (18,8 pour cent de la terre ferme). On en trouve sur tous les continents sauf l'Antarctide. Selon le régime thermique, ils se répartissent sur trois zones physiographiques: tempérée, tropicale et subtropicale et cinq régions latitudinales et méridionales.

Les déserts de la première région méridionale se trouvent en Amérique du Nord dans les zones tempérée et subtropicale entre 22° et 44° de latitude nord et s'étendent sur plus de 2 500 km. Ce sont les déserts du Grand Bassin, de Mohave, de Chihuahua, de Sonora. La superficie totale des terres arides de l'Amérique du Nord est égale à 4,256 millions de km² (20 % du territoire du continent) (tableau 1). Les déserts véritables y couvrent environ 9 % du territoire et ne formant pas de zone latitudinale se localisent sur les plateaux et dans les bassins intérieures orientés dans le sens méridional.

La deuxième région désertique se trouve en Amérique du Sud où la bande étroite des déserts péruviens et chiliens (Sechura-Atacama) s'étend, de préférence dans les plaines de piémont et côtières sur trois zones climatiques — tropicale, subtropicale et tempérée — le long du littoral du Pacifique sur une distance de 3 000 km entre 5 et 30° de latitude sud. Les terres arides couvrent environ 19 % du territoire de l'Amérique du Sud et les déserts environ 9 % ou 3,69 millions de km². Une partie des plaines de l'Argentine (déserts de Patagonie et le Gran Chaco) font partie de cette région.

La troisième région, afro-asiatique, s'étend sur une zone gigantesque en bande continue longue de 11 000 km depuis les côtes de l'Atlantique jusqu'à la vallée du Houang-ho en Chine. C'est un vrai royaume des grands déserts du globe terrestre: le Sahara, les déserts de l'Arabie, de l'Asie moyenne, de l'Iran, de Thar, de Takla-Makan, de Gobi, etc.

Sur le continent africain, les déserts se trouvent entre 15 et 30° de latitude nord; en Asie — entre 15 et 35° de latitude nord (Arabie); entre 22 et 48° de latitude nord (Asie Antérieure et Moyenne) et entre 36 et 46 de latitude nord (Asie Centrale). Les déserts du centre et du nord de l'Asie Moyenne se rapportent à la zone tempérée, les déserts du Proche Orient, du sud de l'Asie Moyenne et du Plateau iranien, ainsi que ceux de l'Afrique du Nord et de l'Arabie se rapportent à la zone tropicale et subtropicale [Petrov, 1973].

En Afrique du Nord, les terres arides couvrent 51 % du continent et les déserts (dont le Sahara qui s'étend sur 7 millions de km²) environ 37 % (tableau 1). En Asie Moyenne et au Kazakhstan, les déserts représentent 55 %, en Asie Centrale plus de 50 %, en Arabie 95 %, en Inde 11 % et au Pakistan 88 % du territoire. Au total, les terres arides du continent asiatique couvrent plus de 15 millions de km² ou 37 % du continent dont les déserts plus de 9 millions de km² ou environ 22 %.

La quatrième région est située au sud-ouest africain dans les zones tropicale et subtropicale entre 6 et 33° de latitude sud. La superficie des terres arides est égale à 2,3 millions de km². On y trouve trois déserts et semi-déserts: le désert de Namib, les déserts et semi-déserts du Kalahari et le semi-désert du Grand Karroo sur le plateau. Le désert de Namib rappelle en quelque sorte le désert chilien d'Atacama: la même bande étroite de la terre dépourvue de toute vie s'étendant sur un millier de kilomètres le long de l'océan.

Les déserts de l'Australie forment la cinquième région. Les terres arides couvrent environ 80 % du continent (tableau 1). Cependant, les déserts véritables se trouvent pour la plupart dans la zone tropicale entre 20 et 34° de latitude sud et couvrent une superficie de 3,9 millions de km².

A côté des cinq régions mentionnées, les déserts ne font pas exception en Europe: sur la côte nord de la mer Caspienne et dans le cours inférieur de la Koura et couvrent 2 % du territoire du continent européen, tandis que les semi-déserts ou les terres semi-arides couvrent une superficie de 752 000 km² ou 7,5 % du territoire.

Tableau 1

Superficies des terres arides par continents

Continent	Superficie totale, mille km ²	Semi-aride		Aride		Extra-aride		Superficie totale des terres arides	
		mille km ²	%	mille km ²	%	mille km ²	%	mille km ²	%
Amériques:									
Amérique du Nord	21280	2340,8	11	1489,6	7	425,6	2	4256	20
Amérique Centrale	882	4,4	0,5	0	0	0	0	4,4	0,5
Amérique du Sud	17755	1597,9	9	1420,4	8	355,1	2	3373,4	19
Total	39917	3943,2	10	2910	7,5	780,7	2	7633,9	19,5
Afrique:									
Afrique du Nord	—	4089,1	14	6425,8	22	4381,2	15	14896,1	51
Afrique du Sud	—	1314,4	4,5	876,2	3	146,0	0,5	2336,6	8
Toute l'Afrique continentale	29208	5403,5	18,5	7302	25	4527,2	15,5	17232,7	59
Madagascar	589	53	9	23,6	4	0	0	76,6	13
Total	29797	5456,5	18,5	7325,6	24,5	4527,2	15	17309,3	58
Asie	42365	6354,8	15	8049,4	19	1271	3	15675	37
Australie	7703,8	2234,1	29	3929	51	0	0	6163,1	80
Europe	10032,1	752,5	7,5	200,5	2	0	0	953	9,5
Tous les continents	129815	18741	14,5	22414,4	17	6578,9	5	47743,3	36,5
Autres continents:									
Antarctide, Océanie, etc.	23418	—	—	—	—	—	—	—	—
Superficie totale	153233	18741	12,2	22414,4	14,6	6578,9	4,2	47743,3	31

Ce bref aperçu des déserts du globe serait incomplet si nous ne mentionnions pas les terres arides qui ne font partie d'aucune région mentionnée. Ce sont l'extrémité nord-ouest de la presqu'île du Yucatan, le littoral caraïbe de la Colombie, l'extrémité est du Brésil, l'extrémité sud-est du Madagascar et la côte est du Ceylan.

Au total, les terres arides couvrent 47,7 millions de km² soit environ 31 % de la terre ferme. Cet énorme territoire situé dans les zones tempérée, subtropicale et tropicale présente une grande variété de conditions physiographiques. La carte de l'UNESCO «Répartition des zones arides de la terre» [UNESCO, 1977] montre 44 désignations reflétant toute la variété des conditions climatiques des déserts du monde.

Cela étant, le rythme saisonnier des précipitations qui, de pair avec la température de l'air, exerce, sur le plan écologique, la plus grande influence sur la végétation, permet de dégager 4 types fondamentaux de déserts [Walter, 1968]:

1. Déserts aux précipitations hivernales et à saison sèche en été.
2. Déserts aux précipitations estivales et à saison sèche en hiver.
3. Déserts caractérisés par deux périodes de précipitations ou sans saison de pluie nettement marquée.
4. Déserts sans régularité saisonnière des précipitations ou sans précipitations comme telles.

Malgré la grande diversité des conditions physiographiques des déserts, on peut y dégager certains traits de ressemblance. Vous trouverez une caractéristique comparative des paysages désertiques donnée par M. Petrov dans le tableau 2 (Voir feuille encartée).

Tout d'abord, les déserts ont certaines particularités climatiques communes: l'extrême sécheresse, un déficit constant de l'humidité et la nette prédominance de l'évaporation de la surface d'eau sur les précipitations.

Ils se caractérisent, ensuite, par les traits classiques de l'hydrologie des déserts — fleuves transitants et cours d'eau temporaires, lacs desséchés et écoulement limité.

Enfin, la dynamique du régime hydraulique des horizons superficiels des sables a beaucoup de commun dans tous les déserts. L'intensité de l'humidification des horizons superficiels des sables de barkhanes et la dynamique de leur régime hydraulique sont fonction du volume et de la saison des précipitations atmosphériques, du régime thermique et de la condensation dans le sol.

Les sols de tous les déserts du monde se rapportent au type aride, mais varient selon la zone climatique. Dans la zone tempérée, on trouvera des sols brun gris, dans les zones subtropicales, des sols gris et dans la zone tropicale, des sols brun rougeâtre désertiques. Les solontchaks des dépressions intracontinentales et des plaines basses côtières, ainsi que les solontchaks et les sols de prairie salés des deltas et des vallées sont typiques de tous les déserts du monde.

C'est la flore et la faune des déserts qui présentent les plus grandes différences pour ce qui concerne la nomenclature des espèces et leurs

associations. On dégage les types génétiques de la flore suivants: d'Asie Centrale, irano-touranien, du Sahara-Indus, ouest-saharien, sud-africain, australien, nord-américain et sud-américain.

Les associations végétales de plantes xérophiles (gypsophytes et psammophytes), succulentes et halophiles fortement appauvris sont fréquents dans les déserts. Dans les régions extrêmement sèches, extra-arides, les plantes supérieures sont pratiquement absentes sur de grandes surfaces.

Une végétation clairsemée, de pauvre nomenclature des espèces et la persistance des plantes édifiatrices, en voilà des traits caractéristiques communs de la végétation des déserts.

La majorité de ces traits ont été introduits dans la définition du désert par I. Walter (1911). «C'est un pays de paradoxes géographiques et il est aussi difficile d'avoir une idée impassible des propriétés caractéristiques d'un paysage désertique que d'exprimer cette idée par des mots. Des nuages sans pluie, des sources sans ruisseaux, des rivières sans embouchures, des lacs sans écoulement, des vallées sèches, des dépôts deltaïques secs; de lacs desséchés, des dépressions sèches au-dessous du niveau de la mer . . ., de gigantesques cuvettes ne débouchant sur aucune vallée . . ., une intense altération sans produits de décomposition . . . Un observateur attentif du désert verra ces phénomènes extraordinaires et beaucoup d'autres».

Selon I. Guérassimov (1954), les déserts contemporains représentent de vastes champs d'activité destructrice des processus éoliens spontanés. C'est sous l'effet de ceux-ci que doivent s'effacer dans les déserts les traces de tous les processus antérieurs de caractère non désertique et que se créent de grandes formations géologiques dépourvues de vie — «de gigantesques amas de débris de roches», «d'énormes dépôts de sable», etc.

L'action du vent, ou processus éoliens, est extrêmement importante pour la formation du relief des déserts. Cette action se prolongeant dans le temps géologique aboutit à la formation d'énormes massifs de déserts sableux où l'épaisseur du sable maintes fois trié par le vent atteint parfois plusieurs dizaines de mètres.

On estime que les massifs de sable couvrent environ 1/3 ou 1/2 de la totalité des déserts véritables du monde, soit 4,6 à 7,0 millions de km², ce qui équivaut à 3,0 à 4,6 % de la surface de la terre ferme du globe. On peut y ajouter 20000 km² de massifs sableux intracontinentaux dans la zone humide.

Les chiffres suivants illustrent bien le développement des déserts sableux dans les zones arides et semi-arides: en Amérique du Nord les sables couvrent 4 % des terres arides; dans le désert du Sahara, 21 % des sables sont concentrés dans les Grands Ergs oriental et occidental; en Union Soviétique, les déserts de sable s'étendent sur 80 % de la zone aride; en Chine les déserts de sable couvrent plus de 80 % de la surface désertique, y compris le désert de Gobi; en Australie, les sables s'étendent sur 50 % de la surface du continent ou sur 75 %

de sa zone aride. En Afrique du Sud et en Amérique du Sud, les surfaces couvertes de sable sont minimales.

Les déserts d'Arabie (dont Rub'al-Khâli — 789 000 km² et le Grand Nufûd — 80 000 km²) forment le plus grand massif de sable au monde. La superficie des ergs au Sahara est égale à 600 000 km². Les ergs sont les plus fréquents au Sahara occidental et dans le désert de Libye et du nord et du sud du plateau du Sahara central. Ce sont soit de petites masses de sable sous forme de dunes à crête en U (sifs) soit des chaînes de dunes (dras) s'étendant sur des dizaines, voire centaines de kilomètres. La forme des dunes rappelle celle des ondes de mer, c'est pourquoi le paysage saharien est souvent évoqué comme une mer. Parmi les plus grands ergs, citons le Grand Erg oriental, le Grand Erg occidental, les ergs Mourzouk, Ubari, Chech et d'autres. La superficie d'un grand erg peut atteindre plusieurs milliers de km².

La disposition des ergs est zonale. Le géologue français M. Lelubre a mis en évidence trois zones d'ergs. La première commence au Sénégal et traverse l'Algérie. Elle comprend d'erg Chech, le Grand Erg occidental et le Grand Erg oriental. La deuxième zone s'étend des deux côtés du massif du Hoggar et passe par les ergs du Niger ainsi que par les ergs Ubari et Mourzouk à Fezzan. La troisième zone entoure le plateau du Tibesti et comprend, au nord-est, les ergs du désert de Libye.

En règle générale, les ergs sont associés aux zones marginales des dépressions à sédimentation alluviale et lacustre récente et ce sont les sédiments formés par le dessèchement des lacs qui servent de roche mère pour ces massifs de sable.

Un autre désert figurant parmi les plus grands au monde, Takla-Makan (271 000 km²), se trouve en Asie Centrale au cœur du bassin intérieur du Tarim. Le désert de Takla-Makan est formé de sédiments alluviaux quaternaires meubles de plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Cette assise est travaillée par le vent et recouverte de sables éoliens jusqu'à 300 m d'épaisseur.

Le relief éolien est assez complexe. On y rencontre des chaînes de dunes transversales et longitudinales de 30 à 150 m de hauteur et de 250 à 500 m de largeur, des lentilles de sable et des chaînes de barkhanes complexes. Les dunes pyramidales sont les plus hautes et s'élèvent de 200 à 300 m au-dessus de sables de barkhanes.

En Union Soviétique, le Kara-Koum et le Kyzyl-Koum sont les plus grands déserts sableux. Il en sera question en détail plus bas.

Passons brièvement en revue les autres déserts du monde.

En Asie, outre le désert de Takla-Makan les sables de barkhane mouvants couvrent la majeure partie du désert d'Ho-lan-Chan. Ils y forment trois massifs: Badan-Jareng — au sud-ouest, les sables de Tengri au sud-est et les sables Ulanpu-ho, au nord-est. Sur le reste du territoire, on trouve par-ci par-là de plus petits massifs de sables mouvants. La stabilité des sables est faible, ils accusent une migration perpétuelle et forment des barkhanes moyennes à grandes. La hauteur des chaînes

de barkhanes atteint parfois 200 à 250 m (Badan-Jareng). Sur tout le territoire du désert d'Ho-lan-Chan, les chaînes de barkhanes sont orientées du nord-est au sud-ouest.

Dans le désert de Bei-Chan, les sables couvrent une superficie relativement restreinte se trouvant dans la partie nord-est, vers l'ouest du cours inférieur de l'Edzin-Gol.

Les sables occupent presque tout le territoire du plateau de l'Ordos. Sur ce plateau élevé à 1000 m d'altitude, des massifs de barkhanes alternent avec des chaînes et des dômes de sable occupant de vastes surfaces.

Les déserts sableux couvrent la partie centrale et méridionale de la Dzoungarie. Ce sont les sables Dzossotyn-Elissoun qui s'étendent du nord au sud sur environ 1600 km. Dans les régions périphériques sud, des surfaces particulièrement grandes sont couvertes de sables mouvants. On en rencontre aussi, en taches isolées, dans la plaine de piémont au nord de Thian-Chan, par exemple, près du lac Ebi-Nor.

Deux processus sont à l'origine des massifs de sables mouvants dans les déserts et les semi-déserts de l'Asie Centrale.

Le premier est lié à la déflation naturelle des roches de différente genèse, surtout des dépôts de sable meuble largement développés dans les régions sèches au centre et à l'ouest de l'Asie intérieure: Kachgarie, Dzoungarie et Ho-lan-Chan.

Le second est dû à l'activité anthropique abusive dans les déserts et les semi-déserts de la région. Il est notoire que les déserts de l'Asie Centrale sont habités par l'homme depuis très longtemps. Les déserts et les semi-déserts sont exploités comme pâturages depuis des millénaires. L'agriculture dans les régions orientales et centrales de la Chine, ainsi qu'en Kachgarie date de la même époque. Au cours de cette longue période, le pacage excessif, l'exploitation abusive non seulement de la végétation arbustive mais aussi des plantes herbacées pour le chauffage et le labourage des sables couverts de tapis végétal sans recours aux mesures de fixation ont abouti à l'anéantissement massif de la végétation naturelle, à la déflation des sables fixés par les plantes et à leur transformation en sables mouvants. Presque toutes les régions agricoles anciennes limitrophes de déserts et de semi-déserts sableux, ainsi que les puits dans les déserts, sont entourés d'une large bande de sables de barkhanes mouvants. Les massifs de sable se situent toujours soit aux périphéries des champs soit près des établissements humains, c'est-à-dire là où l'action anthropique a été la plus intense. Ce type des sables est très fréquent dans les déserts et les semi-déserts de l'Asie Centrale.

Les sables éoliens couvrent environ 90 % du territoire du désert de Thar. Le paysage de ce désert sableux accuse trois formes éoliennes principales: chaînes longitudinales, sables de barkhanes et dunes paraboliques ou en râteau perpendiculaires à la direction du vent dominant. Les chaînes longitudinales orientées du nord-est au sud-ouest prédominent dans la partie sud. Leur hauteur moyenne est de 10 à 15 m, la

longueur — de 5 à 10 km, la largeur — de 150 à 200 m. Les barkhanes couvrent une superficie relativement restreinte. Ce type de relief s'est formé là où les sommets des chaînes ont subi une déflation à cause de l'exploitation abusive de la végétation. On y rencontre très peu de barkhanes nettement formées.

Dans la partie pakistanaise du désert de Thar, où le climat est plus sec, les sables de barkhanes sont plus fréquents. La longueur des barkhanes isolées et des chaînes de barkhanes varie entre 100 et 200 m et leur hauteur atteint 20 m, [Petrov, 1973].

A l'extrémité nord-est du désert, la forme prédominante est représentée par de grandes chaînes isolées orientées du sud-sud-ouest au nord-nord-est. Leur hauteur est de 8 à 10 m et la largeur — de 200 à 225 m. Leurs pentes sont plus douces qu'au sud et leur migration est très lente.

Dans la partie nord du désert de Thar on observe, dans les cuvettes interdunaires, des déserts argileux partiellement salés.

Au nord de l'Hindoustan, dans l'interfluve de l'Indus-Jhelum-Chenâb s'étend le désert de Thal composé essentiellement de sédiments alluviaux anciens transportés par ces cours d'eau; prédominant est celui d'un désert sableux. La déflation éolienne du relief est très intense. Le sable se compose de grains réguliers de quartz, de feldspath, de hornblende et d'autres minéraux.

Les déserts sableux de Dacht-i Lût, de Registân et de Khârân sont situés sur le Plateau iranien et sont caractérisés par un relief d'accumulation éolien nettement accusé. L'intense déflation des sédiments superficiels meubles est à l'origine de toutes les formes typiques du relief éolien des déserts sableux d'Asie: dômes de sables, chaînes de dunes et barkhanes.

Le désert de Dacht-i Lût est situé au sud-est de l'Iran et s'étend sur près de 1100 km du nord-ouest au sud-est [Petrov, 1973]. A côté des déserts sableux, on trouve dans son paysage des déserts salants, des déserts caillouteux et des déserts rocheux de montagne. La partie centrale de ce désert est caractérisée par les formes de déflation et de relief des sables mouvants suivantes: accumulations de sable du côté sous le vent des collines, barkhanes en forme de croissant et gros massifs de sables de barkhanes, niches de déflation et buttes témoins.

La formation du relief est due essentiellement à l'action des vents du nord et du nord-ouest. Par conséquent, de grandes masses de sable sont transportées vers le sud du désert pour y former des chaînes de barkhanes hautes de 10 à 15 m.

Le désert de Registân est situé dans la partie est d'un vaste bassin intérieur et occupe la rive gauche de la rivière Hilmand et de son affluent Arghanddab. C'est la partie la plus aride et désertique de l'Afghanistan. Elle est couverte de sables de barkhanes à faible couvert végétal. Le relief est plutôt dunaire, d'orientation méridionale. Les barkhanes atteignent parfois une hauteur de 60 m.

Le désert de Rub'al-Khâlî est le plus grand désert de l'Arabie. Ses

sables sont essentiellement d'origine alluviale. Les formes des sables mouvants sont très variées, depuis des barkhanes isolées jusqu'à des accumulations puissantes sous forme de dunes longitudinales ou de massifs de sable isolés hauts de jusqu'à 200 m.

Sur la majeure partie du désert de Rub'al-Khâlî, les chaînes de barkhanes sont orientées du nord-est au sud-est et dans la partie orientale, elles suivent la direction latitudinale [Brawn, 1960].

On y trouve essentiellement les types suivants des sables [Kingdom . . . 1956—1964]:

1. Formes transversales du relief. Ce sont surtout des barkhanes mouvantes simples et complexes ou de simples bancs arrondis orientés en travers du vent dominant.

2. Formes longitudinales qui se caractérisent, grosso modo, par l'allongement des formes isolées parallèlement au vent dominant. Elles sont souvent fixées par une végétation clairsemée.

3. Formes variées de chaînes étroites de dunes à crête aigüe et de chaînes de barkhanes quasi parallèles et séparées par de larges vallées de sable comportant généralement des éléments des sables du premier type.

4. Collines. Les formes prédominantes sont de gros massifs de sable, la crête à la hauteur de 50 à 300 m souvent avec des dunes superposées formant des types variés de barkhanes complexes. Les formes sigmoïdes et pyramidales, ainsi que d'énormes collines ovales ou allongées sont caractéristiques pour cette région.

Quelques massifs de sable de moindre importance se trouvent dans la partie centrale de la péninsule, Arabique ce sont les Grand et Petit Nufud, Nufud-al-Dahi, El-Hassa et d'autres. Le désert de Syrie occupe la partie nord de la péninsule.

L'Afrique du Nord abrite l'énorme désert du Sahara l'étendant depuis le littoral de l'océan Atlantique jusqu'à la vallée du Nil. Le désert se poursuit jusque sur la rive droite du Nil où se trouvent les déserts Arabique et de Nubie qui sont relativement petits. Sur le plan géomorphologique, les déserts sableux du Sahara sont très variés par leur forme, ainsi que par leur âge. R. Kapo-Rey (1958) les classe en ergs jeunes, mûrs, séniles et morts.

Les jeunes ergs sont dus à la déflation des alluvions récentes dans les vallées de rivière (oued). Dans les ergs mûrs, l'action de l'écoulement superficiel cesse et un équilibre s'établit entre la déflation et l'accumulation éolienne. Des processus éoliens intenses sont caractéristiques pour les ergs séniles, d'où une déformation complète de la surface primaire qui se couvre d'une couche épaisse de sable éolien. Les sables couverts de végétation se rapportent aux ergs morts. Leur relief est aplani, ils sont compacts et immobiles.

Selon R. Kapo-Rey (1958), les sables mouvants du Sahara ont connu, pendant la formation du relief, la succession de phases suivante: barkhane classique -- sif (accumulation de sable de configuration vague à crête en forme de S). Les sifs forment des chaînes, des bourrelets

et des massifs. En tant qu'une forme particulière du relief, l'auteur dégage les sables pyramidaux. Cette richesse de formes que revêtent les sables mouvants du Sahara est conditionnée par la grande variété du régime éolien.

Trois déserts sont situés au sud de l'Afrique: le désert sableux de Namib qui s'étend en bande étroite le long du littoral de l'océan Atlantique; le désert du Kalahari situé sur le plateau central et le semi-désert de montagne le Grand Karroo.

Le désert de Namib est situé sur le littoral sud-ouest de l'Afrique entre l'Orange et le Cunene sur une plaine de piémont inclinée composée de sédiments marins, proluviaux et alluviaux qui se réchauffent assez facilement. C'est pourquoi on y trouve des sables mouvants qui, dans le cours inférieur du fleuve Orange, pénètrent au cœur du continent en bande étroite. Le relief des sables est formé de barkhanes de différente taille qui se combinent souvent en des formes complexes de chaînes de barkhanes hautes de quelques dizaines de mètres. Au nord, les accumulations de sable forment un énorme massif long de 450 km. La hauteur des dunes atteint 30 à 40 m. Leur mobilité est faible [Petrov, 1973].

On distingue quatre groupes de déserts en Amérique du Nord: Chihuahua, Sonora, Mohave et le Grand Bassin. Le trait particulier de la géomorphologie des régions arides de l'Amérique du Nord est que les structures morphologiques du même type ne couvrent pas de grandes surfaces. On y rencontre le plus souvent des structures morphologiques complexes caractérisées par une alternance de crêtes assez basses et de larges bassins intérieurs comblés de sédiments alluviaux, proluviaux et lacustres [Petrov, 1973].

Les sédiments de surface sont représentés essentiellement par de jeunes dépôts proluviaux ou alluviaux meubles et des alluvions de gravier et de pierraille. Ils sont partiellement altérés par le vent et redéposés sous forme d'un relief éolien. Les déserts de la plaine basse de Californie et du Colorado sont plus uniformes. Ils y couvrent de vastes régions de plaine côtière et alluviale ancienne.

En Amérique du Sud, les déserts s'étendent le long du littoral occidental du Pérou et du Chili et sur le plateau de Patagonie.

Dans les déserts côtiers du Pérou et du Chili, le caractère des assises superficielles et les formes du relief témoignent d'un climat extra-aride. Les formes éoliennes du relief y sont classiques et présentent essentiellement des barkhanes isolées et des chaînes de barkhanes. On y trouve également quelques gros massifs de barkhanes. Ils ne sont pas fixés par la végétation à cause du climat extra-aride.

La majeure partie du littoral péruvien et chilien est couverte de déserts de pierre et de croûtes de sel alternant parfois avec des déserts de galets ou de grands massifs de sables mouvants.

Les déserts sableux sont associés à des vallées anciennes et à des deltas de fleuve. Ils s'étaient formés essentiellement par la déflation des alluvions sableuses anciennes transportées depuis les montagnes par les ri-

vières et les crues boueuses. Parfois, les accumulations de sables éoliens ont la forme de chaînes de barkhanes complexes [Kosok, 1965].

Comme il a été dit plus haut, les déserts occupent la majeure partie de l'Australie. On y trouve le Great Sandy Desert à chaînes de dunes couvertes de végétation, le désert sableux de Simpson, le désert de pierre et de galets de Gibson, le Grand Désert Victoria et le désert de sable et de galets de la plaine de Nullarbor.

G. Mabbutt (1968) a classé les formes éoliennes du relief des déserts de l'Australie en: déserts sableux, sables amassés en crêtes de différents types, sables réticulaires et sables de barkhanes. Les sables amassés en crêtes sont typiques pour tous les déserts australiens et sont extrêmement variés depuis les chaînes de dunes allongées uniformes jusqu'à des formes de relief plus courtes, moins nettement orientées passant parfois en sables réticulaires de forme irrégulière. La hauteur des chaînes est généralement de 10 à 25 m, rarement de 5 à 35 m, et elles sont espacées de 300 à 500 m. Les chaînes s'étendent sur des dizaines de kilomètres et sont parallèles, mais, parfois, se réunissent en angles. Au sud-est, les chaînes suivent la direction nord ou nord-ouest et, au nord, la direction ouest.

Dans les vastes dépressions lacustres, on rencontre des sables au relief réticulaire des chaînes. Les bords de certains lacs salés de l'Australie occidentale présentent des formes éoliennes originales du relief des barkhanes.

Le Great Sandy Désert (360000 km²) est situé au nord-ouest du continent. Les sables amassés en crêtes fixés par la végétation en occupent la majeure partie. La disposition des chaînes est latitudinale, elles sont parallèles et espacées de 400 à 800 m. La longueur d'une chaîne fait en moyenne 40 à 50 km et la hauteur environ 15 m [Madigan, 1936].

Le Grand Désert Victoria est situé dans la partie sud de l'Australie centrale. Son relief présente une alternance régulière de chaînes de dunes d'orientation latitudinale. Par leur étendue, hauteur et largeur ces chaînes de dunes sont semblables à celles du Great Sandy Desert.

Le désert de Gibson est situé entre le Great Sandy Desert et le Grand Désert Victoria. Ses paysages présentent des déserts sableux à relief en chaînes de dunes fixées par la végétation et par endroits, des déserts de sable, de galets et de pierre autour des chaînes insulaires.

Dans la partie occidentale du Grand Bassin Artésien s'étend le désert de Simpson — un ensemble de déserts de sable, de pierre, de galets et d'argile. Les chaînes de dunes sont orientées du nord-ouest au sud-est, ce qui s'explique par un régime éolien spécifique.

Dans les déserts, on rencontre souvent des associations végétales xérophiles (gypsophytes et psammophytes), succulentes et halophiles fortement appauvries. Dans les régions extra-arides, les plantes supérieures font défaut sur de grandes étendues.

Les traits caractéristiques communs de la végétation désertique sont: distribution clairsemée, pauvreté en espèces et persistance des plantes édifiatrices.

1.2. CONDITIONS PHYSIOGRAPHIQUES DES DESERTS DE L'U.R.S.S.

En Union Soviétique, les déserts s'étendent sur 250 millions d'ha environ, soit sur plus de 10 % du territoire national. La quasi-totalité des déserts (94 %) se trouvent au Kazakhstan, en Ouzbékistan et en Turkménistan. La frontière nord des déserts coïncide avec la bande des sols châtaîns clair et avec l'isohyète de 180 mm de la moyenne annuelle de pluviométrie [Fedorovitch et al., 1963]. Le long de la frontière nord des déserts passe, dans la période froide de l'année, l'axe du contrefort ouest de l'anticyclone sibérien responsable pour les particularités climatiques de la saison d'hiver. Ainsi la frontière nord des déserts en tant que région physiographique particulière n'est pas seulement déterminée par des particularités du paysage, mais aussi par une frontière climatique très importante fixée selon le facteur circulatoire [Tchelpanova, 1963].

Les déserts forment une vaste ceinture située entre 36 et 48° (par endroits jusqu'à 50°) de latitude nord et entre 48 et 82° de longitude et couvrant un territoire allant de la péninsule d'Apchéron et de la rive gauche du delta de la Volga jusqu'aux piedmonts au sud et au sud-est de l'URSS. Sur cet immense territoire, que s'étend sur 1500 km environ du nord au sud et sur plus de 2500 km de l'ouest à l'est sont situés tous les déserts connus: déserts de pierre d'Oust-Ourt et de Betpak-Dala, plaine argilo-sableuse Précaspicienne, déserts sableux de Kara-Koum, de Kyzyl-Koum, de Mouiun-Koum, de Sary-Ichikotrau, l'Aral, Steppe Affamée argileuse, Steppe de Karakalpak, Steppe de Karchi, sables de Soundoukli, et d'autres de moindre importance (fig. 1).

La bande des déserts passe sur la côte nord de la mer Caspienne, dans l'interfluve de la Volga et de l'Oural, en gros massifs semi-désertiques des sables de Naryn et sur la côte ouest de la mer Caspienne s'étendent les sables de Tersk-Koum, les steppes arides de Mil et de Mougan. Ils sont tous également considérés comme le prolongement de la ceinture désertique sur le territoire de l'Union Soviétique.

Les déserts de l'Union Soviétique sont situés dans de basses plaines dont l'altitude varie de -28 m sur la côte caspienne et de -129 m dans la dépression de Karaghié à +300 à +400 m sur les buttes témoins. Les étendues plates (il s'agit surtout de la basse plaine Touranienne) sont traversées, à l'est, par des chaînes de basses montagnes et de buttes témoins: Soultan-Ouizdag (485 m), Boukan-Tau (758 m), Tamdy-Tau (888 m), Kouldjek-Tau (784 m), ainsi que par les chaînes montagneuses de Kara-Tau (2176 m) et de Noura-Tau (2169 m) appartenant au système montagneux du Thian-Chan.

Au sud, la plaine Touranienne confine directement aux monts de Kopet-Dag (Grand Balkhan, Petit Balkhan, Kouren-Dag et Paropamiz), à l'est, aux monts du Pamir-Altaï.

Au nord-ouest et au nord, la plaine Touranienne passe en plateau de Krasnovodsk, fortement accidenté, (son altitude moyenne est de 220 m) et vaste plateau ondulé d'Oust-Ourt de 150 à 230 m d'alti-

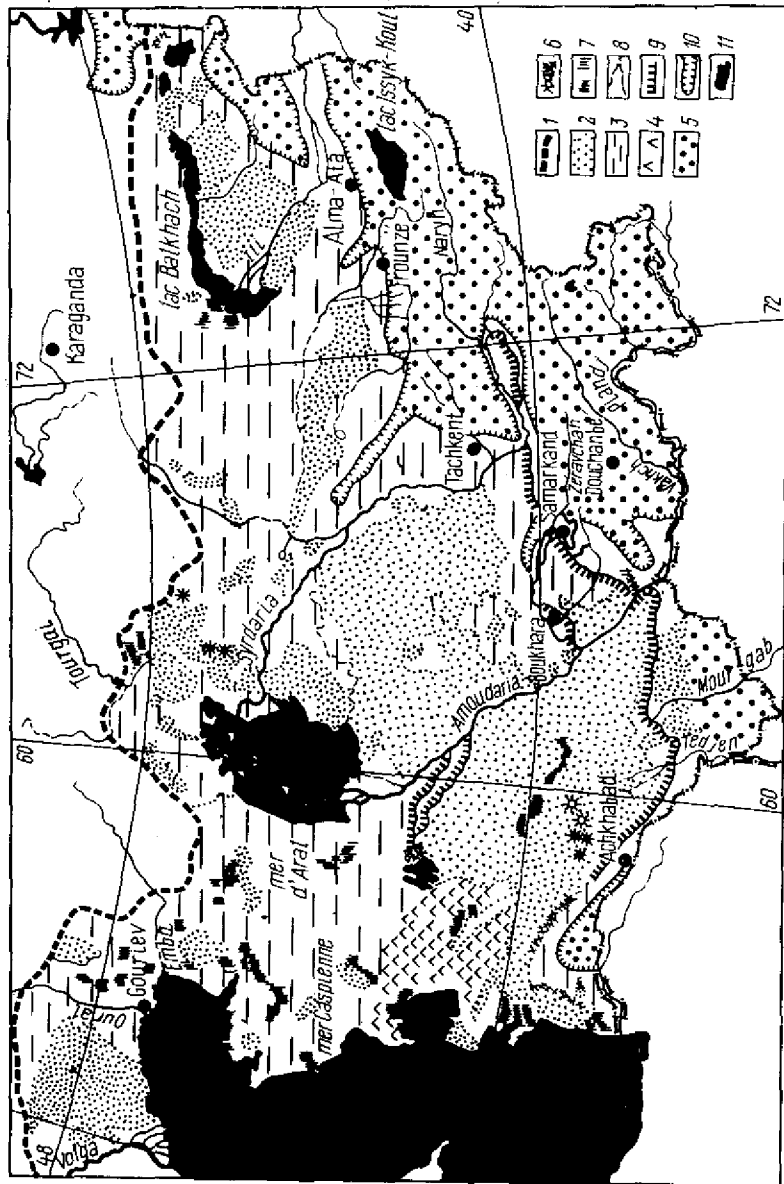


Fig. 1. Les déserts de l'Asie Moyenne et du Kazakhstan:

1 — limite nord des déserts

Types de désert:

2 — sableux; 3 — argileux; 4 — gypseux; 5 — de loess; 6 — takyr ponctuel et étendu; 7 — solontchak; 8 — rivières desséchant et lits secs; 9 — canaux principaux; 10 — domaines montagneux; 11 — mers et lacs

tude, au nord-est, elle confine aux plaines ondulées de Tourgaï et du Kazakhstan du Nord.

Les plaines de l'Asie Moyenne et du Kazakhstan sont d'origine différente. Les différences les plus notables consistent dans l'âge et la structure géologique des déserts. Les terrains les plus anciens se situent au nord de la bande désertique. Il s'agit du relief ondulé du domaine plissé du Kazakhstan, du désert de Betpak-Dala et des inselbergs du Kyzyl-Koum formés de terrains paléozoïques et mésozoïques à affleurements de roches cristallines.

La partie nord-ouest du Turkménistan, s'étendant de la mer Caspienne au lit sec de l'Ouzboï ouest, est également composée de terrains paléozoïques et mésozoïques, essentiellement crétacés et jurassiques.

Les parties occidentale, centrale et méridionale des déserts sont beaucoup plus jeunes. Les plateaux d'Oust-Ourt et de Krasnovodsk sont constitués de terrains d'âge néogène et tertiaire. Par suite de l'absence de cours d'eau et de la faible pluviométrie, le relief des plateaux est peu disloqué. La formation des éluvions graveleuses à sols brun gris gypseux a abouti à l'apparition d'un désert graveleux [Petrov, 1973].

La formation du Kara-Koum de Transoungouz date du Pliocène. L'assise de Transoungouz s'est constituée entre le Sormatien supérieur et le Pontien inclusivement.

Les basses plaines de l'Asie moyenne se sont formées au Quaternaire inférieur ou bien doivent leur origine aux vallées et aux deltas contemporains de l'Amoudaria, du Syrdaria, du Mourgab et du Tedjen. Les plaines alluviales occupent d'immenses territoires dans la basse plaine Touranienne et sont formées d'une épaisse assise sableuse. Les dépôts des vallées fluviales et des deltas contemporains se caractérisent par une fréquente alternance de minces horizons de différente granulométrie, tandis que les sables éoliens constituent une couche homogène de sables de préférence fins [Petrov, 1973].

L'histoire géologique a déterminé la structure, l'épaisseur des horizons et le mode de gisement des roches, ainsi que le relief des déserts. Les déserts sableux sont caractérisés par des formes éoliennes du relief. La principale forme du relief sableux des déserts de l'Asie Moyenne et du Kazakhstan méridional présente des chaînes de dunes parallèles. Elles sont étendues en longueur, mais peu élevées. La longueur des dunes de sable va de quelques centaines de mètres à quelques dizaines de kilomètres; leur largeur est de 10 ou 20 m à 1 km, parfois davantage; leur hauteur est de 5 ou 6 à 60 m. Leur paramètres ne sont pas les mêmes en différents secteurs de désert. Par endroits, de longues et hautes dunes sont reliées entre elles par des dunes courtes et basses perpendiculaires. On est alors en présence d'un modèle parcellaire.

Outre les dunes de sable, le relief désertique comporte des collines de sables hautes de 2 à 15 ou 18 m couvertes de végétation arbustive et herbacée. On rencontre, par endroits, des foyers de déflation entre les collines. Grâce à la végétation, les collines de sable comportent beau-

coup d'éléments propices à la formation de sols désertiques primitifs. A la différence des dunes, les collines sont généralement disposées de manière irrégulière. Dans les déserts de l'Asie Moyenne et du Kazakhstan méridional, certains secteurs sont occupés par des amas de sable accumulés sous les arbustes, ainsi que par des sables ondulés à pentes douces, que sont plus propices à l'exploitation [Babaev, 1973].

Les barkhanes représentent une forme éolienne particulière. En règle générale, la hauteur des barkhanes types est de 1 à 2 m. Les barkhanes caractérisées sont rares dans les déserts: les conditions idéales pour leur formation sont souvent absentes. Généralement, on rencontre dans le désert d'importantes accumulations de sables sous forme de chaînes de barkhanes. Les terres basses désertiques sont essentiellement occupées par des takyrs (déserts argileux) ou des solontchaks (déserts salants).

Le caractère accidenté du relief désertique se trouve accentué près des lits secs de rivières desséchées et de cours d'eau temporaires. Le plus long lit sec est celui de l'Ouzboï occidental, jadis une rivière vivante qui recevait les excédents des eaux du lac de Sarykamych relié, à son tour, à l'Amoudaria.

Dans le sens latitudinal, le Kara-Koum est divisé en deux parties par la dépression d'Oungouz, une bande de cuvettes comportant des takyrs, des solontchaks, des formes sableuses éoliennes.

Au Kyzyl-Koum, de faibles élévations de 1000 m et plus dominant de désert environnant, ainsi que des cirques fermés et des lits secs rompent la planitude générale du relief. Les sédiments alluviaux du Syrdaria sont de grande importance pour la formation de la surface du Kyzyl-Koum.

Une plaine de piedmont comblée de matériaux proluviaux grenus fins et détritiques grossiers sépare les montagnes et le désert. Cette plaine est recouverte de puissante assise de sédiments lœssoides fins. Généralement, elle est traversée de petites rivières sortant de gorges montagneuses et formant dans leur cours inférieur des cônes de déjection. Les proluvions limoneuses peu compactes sont à l'origine du régime hydraulique favorable des déserts de piedmont formés de lœss.

La plaine de piedmont du Kopet-Dag passe, à l'ouest et au sud-ouest, en plaine de takyrs formée d'argiles lourdes et de limons épais de 8 à 10 m. La largeur de la plaine de takyrs est variable. Les plus grandes superficies sont observées au sud-ouest dans la zone d'Atrek, au nord du Kyzyl-Arvat et à proximité du delta du Tedjen. La sévérité du régime hydraulique des déserts de takyrs explique l'absence de plantes supérieures.

Selon la lithologie et les traits de paysage, on peut dégager les types suivants de déserts en Asie moyenne et au Kazakhstan méridional: déserts sableux, pierreux, argileux et salants (solontchaks); ceux-ci, à leur tour, se laissent subdiviser en classes taxonomiques inférieures suivant les particularités lithologiques, pétrographiques, géomorphologiques et faciales des terrains.

Les déserts sableux représentent le type de désert le plus classique. Ils se développent essentiellement sur l'épais dépôt meubles de sable d'origine généralement fluviale ou marine. M. Petrov (1973) distingue quatre sous-types génétiques de déserts sableux: plaines alluviales anciennes, plaines littorales, plaines de piedmont et plaines structurales anciennes composées de terrains du Tertiaire et du Crétacé. Font partie du premier sous-type: le Bas Kara-Koum, le Sary-Iclikotrau, le Mouïun-Koum, le Kara-Koum d'Aral; du second type: les sables de la plaine Précaspicienne septentrionale. Les déserts sableux des plaines de piedmont constituent de petits massifs au pied du Kopet-Dag. D'importantes surfaces de déserts sableux sur des plaines structurales se rencontrent dans le Kara-Koum de Transoungouz et le Kyzyl-Koum.

Dans des conditions favorables — humidification atmosphérique suffisante, niveau élevé de la nappe phréatique comportant des eaux douces ou faiblement minéralisées, régime éolien modéré et faible salinité des terrains — les masses de sables éoliens se trouvent fixées par des plantes arénicoles. Par contre, dans des conditions défavorables pour la végétation ou à la suite d'une activité économique abusive, on voit se former dans les déserts des massifs de sables mouvants dénudés.

Les déserts pierreux se sont formés essentiellement dans les zones où les roches de base compactes affleurent à la surface du jour. Ce type de déserts se subdivise selon les conditions de genèse en trois variétés: déserts formés sur des plaines surélevées compactes; déserts formés sur des pénéplaines; déserts formés sur les proluvions des plaines de piedmont et les déjections graveleuses des cours d'eau temporaires [Babaev, Freikin, 1977].

La végétation des déserts de pierre est faiblement développée et très lésée à cause des conditions pédologiques défavorables. Il s'agit surtout des armoises et d'arbrisseaux (*Salsola*, *Tamarix*). Les sols végétaux sont faiblement développés.

On distingue parmi les déserts argileux ceux de lœss, de limon, de takyrs et de bad-lands. Les déserts argileux de lœss se situent sur les plaines de piedmont inclinées composées de proluvions et d'alluvions argileuses et limoneuses. Les sols sont gris et de faible salinité. La végétation est représentée par des associations herbacées de type éphémère.

Les déserts limoneux occupent de vastes plaines et des plateaux stratiformes du Kazakhstan. Les sols sont brun gris, faiblement minéralisés, couverts d'associations d'*Artemesia* et d'*Artemesia Salsola*.

Les déserts argileux de takyrs s'associent aux plaines de piedmont et aux deltas anciens de l'Amoudaria, du Syrdaria, du Mourgab, du Tedjen, du Kachkadarja et d'autres rivières, tandis que les déserts de bad-lands occupent des bas piedmonts du Kopet-Dag occidental, les hauteurs du Mangychlak central et de la partie méridionale des plaines à buttes du Kazakhstan [Petrov, 1973]. La végétation de ces types de déserts est extrêmement pauvre.

Les déserts salants (solontchaks) constituent des îlots dans toute la

zone désertique. Les solontchaks sont dus à la migration verticale des eaux salées venues des couches supérieures à la surface du jour dans des dépressions. En règle générale, ils tendent vers les périphéries de deltas et de terrasses secs, anciens et contemporains, et occupent les rives desséchées des bassins marins et lacustres, les fonds d'importantes dépressions sans écoulement. Le principal facteur des déserts de solontchak, c'est la proximité de la nappe phréatique salée, l'absence d'écoulement et un faible drainage du terrain. Les déserts de solontchak sont les formations les plus stériles.

Les particularités physiographiques des déserts de l'Union Soviétique proviennent de la situation géographique au cœur du continent asiatique, du voisinage de la région méditerranéenne, de l'Hindoustan, de l'Asie Centrale et de la Sibérie. L'influence de toutes ces régions sur le climat de la zone en question est très bien suivie.

La situation des déserts de l'Union Soviétique au centre du vaste continent euro-asiatique, l'étendue de la région en latitude et en longitude, la présence, au sud, au sud-est et à l'est de massifs montagneux, l'ouverture du territoire au nord, déterminent le caractère continental et l'aridité du climat. Le caractère continental se manifeste par des changements brusques des éléments météorologiques à l'échelle journalière et annuelle et l'aridité, par la faible pluviométrie, la sécheresse de l'air, la faible nébulosité et l'évaporation intense.

La zonalité latitudinale et les particularités du régime de la circulation atmosphérique aboutissent à des disparités considérables entre les éléments climatiques des parties nord et sud du territoire, aussi bien en saison froide qu'en saison chaude de l'année.

La partie nord du territoire désertique se trouve exposée, en saison froide, à l'anticyclone sibérien. L'hiver y est donc très rigoureux pour ces latitudes, avec des températures très basses et une couverture nivale stable. Les cyclones, apportant un temps couvert et des chutes de neige, ne passent que dans la période d'affaiblissement de l'anticyclone sibérien. Dans la partie sud de la zone des déserts, le temps en hiver est déterminé par d'autres processus atmosphériques. Dans cette période de l'année, sur la branche iranienne du front polaire se développe une activité cyclonique intense arrivant à son maximum dans la seconde moitié de l'hiver et au printemps. Cela explique un temps relativement doux et instable en hiver dans la partie sud du territoire désertique.

En saison chaude, les différences de la circulation atmosphérique dans les parties nord et sud des déserts se maintiennent. Au-dessus de la partie sud, les phénomènes cycloniques sont très faibles en été; de la seconde moitié du mois de mai au mois d'octobre, le temps est très clair, chaud et sec. Dès juin, en règle générale, une dépression thermique s'y établit et détermine un temps chaud et sec monotone. La période sans pluies dure plus de trois mois. La dépression thermique n'envahit pas les régions nord des déserts, où les phénomènes cycloniques sont assez intenses en saison chaude.

Au fur et à mesure que se renforcent les phénomènes cycloniques dans les régions sud, la pluviométrie s'accroît progressivement dès le mois d'octobre pour atteindre le maximum en mars-avril. Ensuite, on assiste à une décroissance brusque des précipitations; en juillet, la pluviométrie est voisine de zéro. Dans les régions nord, les précipitations se répartissent d'une façon plus régulière au cours de l'année. Ici, on note deux légers maximums: à la fin de l'automne et du printemps.

L'analyse de la répartition annuelle des précipitations atmosphériques en Asie Moyenne et au Kazakhstan méridional montre que la diminution de la pluviométrie en été se fait par sauts jusqu'à un minimum tout à fait insignifiant pour les latitudes nord entre 42 et 45°. C'est là qu'on situe généralement la limite entre les sous-zones nord et sud des déserts: de la partie nord du golfe de Kara-Bogas-Gol en passant par le delta de l'Amoudaria, puis par la bordure sud des monts de Boukan-Tau vers la chaîne de Kara-Tau. A l'est, cette ligne de changement de pluviométrie passe par les chaînes de Kara-Tau et de Talasski Ala-Tau [Tchetyrkin, 1960]. C'est là que passe également la frontière nord de la zone de culture des variétés précoces de coton assurées à 100 % par les ressources thermiques, ce qui est étroitement corrélé aux sommes des températures moyennes journalières de l'air ambiant au-dessus de 10 °C égales à 4000 °C.

Selon la classification du climat proposée par A. Grigoriev et M. Boudyko (1959), la sous-zone nord des déserts est caractérisée par un climat sec, aux étés chaudes et aux hivers relativement rigoureux et peu neigeux; la sous-zone sud a un climat sec aux étés extrêmement chauds et aux hivers relativement doux.

La haute position du soleil au-dessus de l'horizon et la faible nébulosité en saison chaude déterminent une longue durée de l'insolation: de 2000 h au nord et jusqu'à 3000 h et plus par an près des frontières sud des déserts. Les jours sans soleil sont rares ici, la probabilité d'un ciel serein atteint 90–95 %. Seulement à la limite nord de la zone désertique, on compte 60 jours nuageux environ par an. Dans la sous-zone sud des déserts, le nombre de jours sans soleil diminue jusqu'à 25 à 30 par an.

Par conséquent, le territoire désertique reçoit d'importantes quantités de rayonnement solaire. Le total annuel de rayonnement varie de 120 kcal/cm² dans la sous-zone nord des déserts à 160–170 kcal/cm² dans la partie sud. En dépit des grandes valeurs du rayonnement effectif et de l'albedo, les chiffres annuels du bilan de rayonnement atteignent 35 kcal/cm² pour la sous-zone nord et plus de 70 kcal/cm² pour le sud des déserts de l'Asie Moyenne [Pivovarova, 1977].

Grâce à l'aridité extrême du climat des déserts, la quasi-totalité du rayonnement solaire sert à réchauffer la surface du sol et l'air. Aussi, les dépenses calorifiques d'évaporation, en été, sont-elles petites; elles ne représentent en moyenne annuelle, pour les déserts sableux, que 10 kcal/cm². En même temps, la valeur annuelle de l'échange thermi-

que turbulent entre la surface du sol et l'air varie de 200 kcal/cm², au nord, à 40 kcal/cm² et plus, au sud [Berland, 1948].

Les hautes valeurs de l'échange thermique turbulent déterminent le régime thermique de l'air. Les températures moyennes annuelles de l'air augmentent, au fur et à mesure qu'on progresse vers le sud, de 5,0 à 11,0 °C, dans la sous-zone nord, et de 13,0 à 16,6 °C, dans la sous-zone sud des déserts. Dans la variation annuelle des températures de l'air, le minimum tombe partout sur janvier, le maximum sur juillet.

La vaste étendue du territoire entraîne d'importants contrastes de températures de l'air entre les sous-zones nord et sud des déserts. Dans la partie nord du territoire, le régime thermique des mois d'hiver est relativement stable. Les dégels n'arrivent qu'une à cinq fois en dix ans. La température de janvier varie dans de larges limites. L'extrémité nord est la plus froide, là, la moyenne des températures de janvier est de -18 °C; dans la partie sud de la sous-zone nord des déserts, elle est de -6 °C. Au nord de l'isotherme de janvier -6 °C sont situés les territoires à prédominance absolue de l'hiver sans végétation propre aux climats de la zone tempérée [Babouchkine, 1964].

La rigueur de l'hiver dans la sous-zone nord diminue rapidement depuis l'hiver extrêmement froid avec de fortes gelées, dans la partie nord, en passant par l'hiver relativement froid avec des gelées considérables dans les parties centrales, à l'hiver doux aux gelées moyennes, au sud de la sous-zone. Les années les plus froides, la température de l'air peut descendre à -45, -48 °C au nord-est, et jusqu'à -30 °C dans le bas cours de l'Amoudaria. La rigueur du temps se trouve accentuée par la prédominance du vent du nord qui apporte de l'air continental froid provenant de l'anticyclone sibérien.

Le territoire de la sous-zone sud se caractérise par des hivers très doux avec des gelées moyennes, dans la partie nord, et des gelées modérées, au sud. Dans le sud-est du Kara-Koum et au sud-ouest du Turkménistan, les moyennes de température de janvier ne baissent pas au-dessous de zéro. Malgré le niveau général relativement élevé des températures d'hiver dans la sous-zone sud des déserts, les changements brusques de température dans cette période de l'année se font sentir plus fortement; les incursions froides peuvent faire tomber les températures minimales à -32 °C au nord et à -26 °C au sud. Les grands froids y sont pourtant passagers, on voit le plus souvent alterner les journées chaudes avec des gelées nocturnes.

Le nombre de jours à gelée constante varie de 160, à l'extrémité nord de la sous-zone nord des déserts, à 80, à sa limite sud. En passant vers la sous-zone sud des déserts la durée de la période de gelées diminue. Dans la partie sud de cette sous-zone, les gelées persistantes ne surviennent qu'en 50 % des hivers.

75 à 80 % des années, juillet est le mois le plus chaud; 10 à 12 % des années, le mois d'août est le plus chaud [Tchelpanova, 1963]. La moyenne des températures de l'air en juillet varie de 24 à 27 °C

dans la sous-zone nord des déserts, les maximums absolus ne dépassant pas 40 à 45 °C. La sous-zone sud se caractérise en juillet par un temps extrêmement chaud avec des températures moyennes journalières de 25 à 35 °C. Les valeurs maximales des températures de l'air sont ici de 46 à 48 °C et même à 50 °C (Repetek, Termez), la température de la surface du sol atteignant ces jours-là 79 °C.

La pluviométrie annuelle est minime dans les deux sous-zones, nord et sud, des déserts; elle varie entre 80 et 200 mm en augmentant dans les déserts de loess de piedmont à 250 à 300 mm. Une aridité particulièrement prononcée est caractéristique pour les déserts de Kara-Koum, de Kyzyl-Koum et de Betpak-Dala, le littoral ouest du lac Balkhach, la vallée de Fergana et la vallée de la rivière Ili, où l'on observe moins de 100 mm de précipitations par an.

La répartition annuelle des précipitations présente des différences notables. Dans la sous-zone nord, la pluviométrie de la saison chaude est supérieure ou égale à celle de la saison froide; dans la sous-zone sud prédominent les précipitations en saison froide. Cela permet d'y distinguer, suivant les conditions de l'humidification naturelle, deux saisons: l'une sèche, de la mi-mai à la mi-octobre, et l'autre humide, le reste de l'année.

En quatre mois de la saison chaude, la pluviométrie de la sous-zone sud est insignifiante allant de 1 mm, dans le Kara-Koum sud-est, à 10 mm, à la frontière de la sous-zone nord [Tchelpanova, 1963]. Cette quantité infime de précipitations en période chaude est négligeable pour la pratique. Dans la sous-zone nord, quoiqu'en saison chaude la pluviométrie soit très faible — 15 à 60 mm, elle est suffisante pour la végétation des armoises. En plus, les précipitations se répartissent de façon égale sur tous les mois d'été.

En saison froide, la pluviométrie devient presque uniforme sur tout le territoire des déserts. Pourtant, dans la sous-zone nord des déserts, les précipitations prennent la forme de neige et produisent une couche nivale stable, tandis qu'au sud, les pluies alternent avec les chutes de neige.

Tout en étant réparties de façon inégale au cours de l'année, les précipitations sont également sujettes à de fortes variations. Il y a des années où, au cours de toute la période chaude, il en tombe très peu et, par contre, des années où presque toute la norme annuelle est resorbée en un mois au printemps.

Un temps sans précipitations est propre au territoire désertique. Le nombre de jours avec précipitations est inférieur à 100. La région à nombre minimal de jours avec précipitations (moins de 40 par an) se trouve au Kara-Koum. Moins de 60 jours avec précipitations sont signalés dans la vallée de Fergana, sur les côtes des mers Caspienne et d'Aral, sur les rives du lac Balkhach. Le nombre de jours dans l'année sans précipitations se répète à raison de 30 à 50 % pour les mois de printemps, cet indice est de 7 à 25 % si l'on ne prend en compte que les précipitations considérables. Le nombre de jours avec des précipita-

tions considérables (9 mm et plus en 12 h) varie de 2 à 6 dans la sous-zone sud des déserts [Soubotina, 1977].

Les températures élevées de l'air en été, la pluviométrie insuffisante et l'absence d'eaux de surface sont autant de facteurs de sécheresse de l'air: de juin à septembre, l'humidité relative baisse jusqu'à 22–25 % dans la sous-zone sud des déserts. En périodes extrêmement chaudes, lorsque la température de l'air dépasse 40 °C, l'humidité de l'air aux heures diurnes peut tomber jusqu'à 3–5 %. Ces jours-la, le déficit d'humidité de l'air atteint des valeurs extrêmement importantes. Ainsi, à Outch-Adji, le 8 juillet 1944 à 13 h, il était de 108,7 mb [Tchelpanova, 1963].

Les hautes valeurs de la température et du déficit d'humidité de l'air déterminent une importante évaporation. Les valeurs annuelles maximales de l'évaporation sont caractéristiques pour le sud-est du Kara-Koum, où elles dépassent 1700 mm [Zoubenok, 1976]. Vers le nord, l'indice de l'évaporation baisse progressivement et varie entre 900 et 1300 mm dans la sous-zone nord des déserts.

L'aridité générale du climat est caractérisée par l'indice de siccité exprimant le rapport entre l'évaporation et la pluviométrie annuelle. Dans la sous-zone nord des déserts, l'indice de siccité augmente de 3,0, au nord, à 8,0–9,0, au sud; dans la sous-zone sud, de 10,0 à 16,0, ce qui atteste l'aridité considérable du climat des déserts de l'Asie Moyenne.

La haute aridité du climat désertique, la mobilité du substrat pédologique et la rareté de la végétation naturelle concourent, à la moindre augmentation de la vitesse du vent, à l'apparition de chasse-sable et de tempêtes de poussière. Ces dernières se déclenchent à un vent de 9 à 14 m/s. Pourtant, dans certaines régions une vitesse du vent déjà de 6 à 8 m/s est suffisante pour déclencher des tempêtes de poussière [Orlovski, 1962; Romanov, 1960]. Celles-ci s'observent durant toute l'année et sont fortement dépendantes des particularités locales. La moyenne annuelle maximale de jours avec tempêtes de poussière a été notée dans le Kara-Koum central et à l'ouest du Turkménistan. Là, on constate dans l'année en moyenne plus de 50 jours avec tempêtes de poussière. Pour la majeure partie du Kara-Koum et du bassin moyen et supérieur du Syrdaria on constate de 30 à 50 jours par an avec tempêtes de poussière; de 10 à 30 jours dans la partie nord du Turkménistan, du Kyzyl-Koum et de la vallée de Fergana. A l'est de l'Oust-Ourt, on note en moyenne de 5 à 10 jours avec tempêtes de poussière par an [Sapojnikova, 1970].

Le dessèchement rapide du sol et le renforcement des vents expliquent que les tempêtes de poussière au Kara-Koum surviennent surtout au printemps. Au Kyzyl-Koum, on observe le maximum de fréquence des tempêtes de poussière surtout en été, ce qui est dû à la fréquence maximale des vents forts en cette saison. Au pied du Kopet-Dag, c'est l'automne qui est la période favorable pour les tempêtes de poussière. A l'échelle journalière, on observe en règle générale deux maximums

de fréquence des tempêtes de poussière: de 10 à 13 h et de 19 à 22 h. Généralement, la durée d'une tempête de poussière ne dépasse pas 3 h. A l'ouest et à l'extrémité sud-est du Turkménistan, dans certaines régions du Kara-Koum central, les tempêtes de poussière sont les plus longues: plus de 5 % des tempêtes durent plus de 24 h. En mai 1950 à Nebit-Dag, une tempête de poussière a duré 73 h; en novembre 1951 à Aïdine — plus de 70 h [Orlovski, 1962].

Le cadre climatique détermine le développement et la croissance de la végétation naturelle, ainsi que le calendrier et les procédés des travaux de phytoamélioration des terres.

Les précipitations atmosphériques créent des réserves d'humidité dans le sol que les plantes utilisent pendant la végétation. Cela étant, l'action favorable des précipitations sur le développement et la croissance des végétaux ne se manifeste qu'en combinaison avec des températures favorables à la vie des plantes. Aussi, chacune des formes végétales, conformément à ses particularités biologiques, réagit-elle différemment sur le milieu extérieur: il y en a dont la végétation se passe en hiver-printemps ou au printemps (éphémères, éphéméroïdes), pour d'autres elle tombe sur le printemps-été, les troisièmes végètent en été (plantes annuelles d'été), les quatrièmes, du printemps à l'automne avancé.

L'aridité du climat conditionne l'absence totale de cours d'eau locaux sur le territoire des déserts. Selon l'expression imagée de V. Shultz (1965), les territoires désertiques de l'Asie Moyenne sont des domaines de dispersion de l'écoulement prenant source dans les montagnes. Il distingue dans ce domaine de dispersion de l'écoulement deux sous-domaines: a) dispersion de l'écoulement superficiel et souterrain; b) dispersion de l'écoulement uniquement souterrain. Une région de plaine recevant en moyenne 96 mm de précipitations atmosphériques et 201 mm sous forme de l'écoulement en provenance des montagnes perd entièrement cette eau (297 mm) par évaporation.

Le réseau hydrographique y est extrêmement pauvre. Beaucoup de rivières se perdent dans les sables en formant des lits et des deltas secs, ou sont épuisées par les prises destinées à l'irrigation. Seuls les deux fleuves les plus importants, l'Amoudaria et le Syrdaria, traversent les déserts sableux pour se jeter dans la mer d'Aral; et encore, au sud-ouest, l'Atrek se jette dans la mer Caspienne et, au nord-est, l'Ili et le Kara-Kol atteignent le lac Balkhach.

Les rivières des déserts de l'Asie Moyenne ont deux crues annuelles: la première au premier tiers de l'année, en saison des pluies printanières abondantes et de la fonte des neiges dans les basses montagnes voisines; la seconde au début de l'été lorsque fondent les neiges éternelles et les glaciers des hautes chaînes de montagne.

En été, certaines rivières se dessèchent ou se transforment en voies d'écoulement des eaux souterraines, leurs lits, comme des drains naturels, aspirant les eaux souterraines s'écoulant dans les terrains alluviaux. En saison d'abondantes pluies d'été et de fonte des neiges, les lits des cours d'eau temporaires, généralement secs, s'emplissent d'eau.

Le climat sec et la diversité des roches-mères contribuent à la complexité et à l'hétérogénéité des sols. Les roches-mères formant les sols des déserts sont des dépôts alluviaux, marins, proluviaux, proluvio-alluviaux et éoliens, ainsi des alluvions de roches.

L'aridité du climat est responsable de la faible intensité des processus biologiques et de la solification, d'où les traits typiques des sols désertiques: faible teneur en humus, faible structuration et forte salinité. Les sols sont surtout brun gris désertiques, silico-désertiques, argilo-siliceux et silico-argileux, ainsi que takyrs et solontchaks. Dans les conditions d'une humidité excessive du sol, dans les vallées et les deltas des rivières se développent les sols de la série hydromorphe: sols alluviaux de prairie, sols de prairie salante, etc. Dans les plaines du piedmont plus riches en précipitations atmosphériques, on trouve des sols gris, reposant sur du loess [Lobova, 1960].

Les sols silico-désertiques sont de formation pédologique la moins évoluée fréquente sur les massifs sableux couverts de végétation. Ils sont pauvres en humus (0,3—0,5 %), mais possèdent la propriété, favorable pour les plantes désertiques, de laisser passer et de conserver l'humidité dans leurs horizons. C'est pourquoi la végétation sur ces sols est nettement plus riche que sur les terrains argileux avoisinants.

Les sols brun gris sont répandus surtout à Oust-Ourt, à Manghy-chlak, sur le plateau de Krasnovodsk, à Betpak-Dala et à Transoungouz et dans les plaines de delta anciennes de l'Amoudaria et du Syrdaria. Dans leur horizon supérieur, ils sont compacts, légèrement alcalins; ils renferment jusqu'à 8 % de gypse et sont mêlés de gravier et de gravillon. Contenant de 0,5 à 0,8 % d'humus, ces sols sont de fertilité naturelle faible.

Les sols gris sont caractéristiques des plaines inclinées du piedmont et des basses montagnes. Ils renferment un peu plus d'humus (jusqu'à 1,5 %) que les sols des plaines, ils sont alcalins et riches en phosphore et en potassium. Parmi les sols désertiques, ils sont les plus aptes à l'agriculture.

Aux périphéries des plaines, là où celles-ci se biseautent, les sols gris sont bordés de takyrs ou de sols takyroïdes. Les takyrs ne contiennent pas plus de 0,5 % d'humus et, l'eau pénétrant mal à travers la croûte argileuse dense, des sels de sodium nuisibles pour les plantes s'accumulent à la profondeur de 15 à 30 cm.

Les sols de prairie résiduels se rencontrent dans les plaines alluviales de l'Amoudaria et du Syrdaria, à l'extrémité nord-ouest des deltas du Mourgab, du Tedjen et du Zeravchan, dans la dépression de Sarykamysh, dans la vallée de l'Ouzboï ouest et au Turkménistan sud-ouest. Ils sont disposés en taches dispersées alternant avec des sables. Leur teneur en humus est assez élevée (3 à 4 %).

A la suite d'une irrigation prolongée, il se forme dans les oasis des sols particuliers, cultivés ou irrigués, ayant un épais horizon supérieur arable et irrigué atteignant jusqu'à 2 m et plus et contenant jusqu'à 6—8 % d'humus.

La différence de composition mécanique et de conditions agro-hydrologiques de ces sols détermine les particularités de leur régime hydrique qui, à leur tour, de même que les éléments climatiques, conditionnent la composition des végétaux, le rythme de leur développement et de leur productivité. La végétation est représentée essentiellement par des psammophytes, des arbrisseaux xérophytes et des halophytes.

M. Petrov (1973) classe la végétation désertique de l'Asie Moyenne en types principaux suivants: végétation ligneuse et arbustive (*Haloxylon persicum*, *H. aphyllum*, *Galligonum caputmedusae*, *C. setosum*, etc.) dans les déserts sableux et sableux-caillouteux; sous-arbrisseaux gypsophiles (*Salsola arbuscula*, *S. rigida*, *S. gemmascens*, *S. laricifolia*, *Anabasis salsa*, *Hammada leptoclada*, etc.). Dans les déserts graveleux et pierreux des plateaux tertiaires; herbacées éphémères et éphéméroïdes (*Poa bulbosa*, *Carex pachystylis*) dans les déserts de lœss; buissons d'armoises (*Artemisia semiarida*, *A. kemrudica*, *Kochia prostrata*, *Eurotia ceratoides*) avec des graminées pérennes (*Agropurum desertorum*, *Stipa cappillata*), ainsi que des éphémères et des éphéméroïdes dans les déserts limoneux, algues et lichens ou tallophytes sur les takyrs, avec des associations particulières de lichens terrestres désertiques (*Diploschistes albissimus*, *Squataria lentigera*, etc.) ou d'algues bleues (*Phormidium*, *Microcoleus*). Les arbrisseaux halophytes (*Halocnemum strobilaceum*, *Halostachys caspica*, *Tamarix laxa*) et les salsolacées annuelles (*Salsola*, *Halogeton*, *Suaeda*) prédominent sur les solontchaks.

La végétation et les sols des déserts forment des associations complexes disposées par taches isolées. Cela s'explique par le voisinage de diverses formes de relief et de sols différant par leur structure et leur humidité.

Les différences du régime hydrothermique des sous-zones désertiques nord et sud se manifestent dans l'aspect général des sols et du tapis végétal.

La sous-zone nord est caractérisée par la prédominance des sols brun gris désertiques à fortes manifestations de salinité et d'alcalinité. Un régime hydrothermique modéré qui y règne n'est pas propice à l'accumulation des carbonates et les sols, par conséquent, sont peu carbonatés.

Les précipitations, peu importantes mais uniformément réparties sur tout l'été, permettent la survie des buissons pérennes à végétation tardive, tels que l'armoise et les salsolacées. La sous-zone nord est celle des déserts à armoise par excellence. Le changement du régime de l'humidification du nord au sud de la sous-zone ne fait changer que les variétés de l'armoise des plantes hygrophiles aux xérophytes. Le tapis végétal est très raréfié.

La végétation des déserts sableux de Sam, de Mouiun-Koum, des Petit et Grand Barsouks se trouvant dans cette zone est beaucoup plus

riche [Kourotchkina, 1978]. On y trouve des associations d'espèces mésophytes et xérophytes.

La sous-zone sud est constituée de sols brun gris et gris fortement carbonatés. Cette forte teneur en carbonates est due à l'été très sec et très chaud. Le régime hydrothermique contribue à l'accumulation des carbonates dans le sol végétal et dans les sol sous-jacents.

Le maximum de précipitations printanières donne naissance à une végétation beaucoup plus abondante que dans la sous-zone nord qui ne connaît pas de telle saison de pluie. Au printemps, chaud et humide, poussent des végétaux spécifiques (éphémères et éphéméroïdes) qui ne se développent pas dans la sous-zone nord. Les éphémères se dessèchent avec l'arrivée de l'été chaud et sec.

Ainsi, les conditions écologiques sont favorables à la végétation des plantes en saison chaude dans la sous-zone nord, et en saison froide dans la sous-zone sud. La végétation n'est pas possible dans la sous-zone nord en hiver à cause des températures basses et d'une faible couverture de neige: dans la sous-zone sud, en cette saison, les conditions climatiques favorisent le développement des éphémères et des éphéméroïdes. En été, même la végétation des xérophytes n'est point possible dans la sous-zone sud à cause de l'absence de précipitations et des températures très élevées, tandis que dans la sous-zone nord, en été, seuls végètent des xérophytes désertiques à végétation tardive.

Trois types essentiels de déserts — sableux, gypseux et argileux — se distinguent dans les sous-zones désertiques nord et sud. Dans la sous-zone nord, on trouve de grands massifs de déserts sableux, dans la sous-zone sud, les déserts de ce type sont prédominants. Dans ce type de désert, la végétation de la sous-zone nord est représentée par des associations d'arbrisseaux et d'herbacées, par différentes espèces de l'armoise et d'autres buissons bas formant l'étage intermédiaire. Les arbustes les plus caractéristiques sont: l'Haloxylon, différentes espèces de Calligonum, le Salsola. Dans la sous-zone sud la végétation des déserts de sable varie des gros arbustes aux éphémères annuelles. La majeure partie de la sous-zone est occupée par des associations à deux étages composées d'arbustes et d'herbacées. Dans le désert sableux, il y a environ une plante pour 20 à 25 m² de surface, soit de 300 à 600 arbres et arbrisseaux par hectare en moyenne. Le taux de couverture projective total par ces plantes fait 12 à 15 % atteignant par endroits 20 à 25 %, diminuant aux sommets des chaînes jusqu'à 1 à 5 % [Ovezliev et al., 1979].

Les déserts gypseux sont très répandus dans les sous-zones nord et sud. Les sols brun gris sont peu carbonatés. La teneur en carbonates augmente vers le sud; les sols brun gris carbonatés alcalins et salins intercalés prédominent dans la sous-zone sud.

Les associations d'armoise et de salsolacées sont caractéristiques de la végétation du désert gypseux dans la sous-zone nord, tandis que dans la sous-zone sud, on rencontre le plus souvent des associations d'arbris-

seaux raréfiées avec une faible participation d'éphémères. Par hectare, il y a quelque dizaines de milliers d'arbrisseaux hauts de 0,2 à 0,5 m et de 0,1 à 0,5 m de diamètre. Le taux de couverture projective fait 10 à 20 %. En dépit des conditions sévères qui règnent dans les déserts gypseux, les arbrisseaux sont résistants au pâturage; ils disparaissent surtout quand ils sont exploités comme bois de feu. Des associations d'arbustes à *Haloxylon aphyllum* et à différentes espèces de tamaris abondants sont propres à la sous-zone nord des déserts argileux, tandis que dans la sous-zone sud, les déserts de ce type sont caractérisés par la prédominance des salsolacées qui est due à une composition mécanique lourde et à une salinité élevée des sols. Le tapis des éphémères est clairsemé. Le taux de couverture projective ne dépasse pas 10 à 20 %.

Sur la bande de contact entre le pied des montagnes et l'avant-pays, on trouve des déserts pierreux de piedmont formant des massifs peu étendus. Le sol végétal est peu développé, le gravier mêlé de faibles quantités de matériaux à granulométrie fine abonde. La végétation présente surtout un étage d'arbrisseaux et de sous-arbrisseaux à prédominance de différentes espèces d'armoïse (*Artemisia*).

Les déserts de loess occupent la majeure partie des piedmonts. Les sols gris y prédominent; la couverture végétale est assez dense et constituée de deux étages d'herbacées; certains massifs comportent des associations à armoïse.

2. METHODES D'AMELIORATION DES SABLES MOUVANTS

2.1. EXPERIENCE MONDIALE DE L'AMELIORATION DES SABLES MOUVANTS

L'expérience mondiale dans le domaine de la fixation et du boisement des sables mouvants dans les zones arides est considérable. Les méthodes phytoamélioratives de la lutte contre la désertification, à côté de la fixation des sables par des protections mécaniques et physico-chimiques, sont les plus traditionnelles et largement appliquées dans les déserts de l'Asie Moyenne, de l'Asie Centrale, du Proche Orient et dans certains pays de l'Afrique du Nord [Petrov, 1974].

Ces méthodes sont suffisamment fiables et permettent de reconquérir de vastes surfaces de terres fertiles pour les intégrer dans la production agricole.

Les méthodes et les volumes des travaux d'amélioration dans le domaine de la fixation des sables varient d'un pays à l'autre et sont fonction des conditions pédologiques et climatiques, de la disponibilité des matériaux d'origine végétale et chimique, du financement des travaux, du niveau de l'équipement technique, de la disponibilité de la main-d'œuvre libre, etc. Nous allons présenter ici-bas un aperçu de l'échelle et de la géographie de ces travaux.

Les zones arides de l'Iran s'étendent sur 80 millions d'ha, ce qui équivaut environ à la moitié du territoire du pays. Un quart de la surface est couvert de déserts salants et pierreux, presque dépourvus de végétation. Les déserts sableux s'étendent sur 12 millions d'ha dont 5 millions d'ha reviennent aux sables mouvants.

Le développement de l'irrigation, l'exploitation de minéraux utiles, la construction de routes et d'ouvrages industriels ont provoqué une intensification de la désertification. La culture désordonnée de la terre et le pacage excessif, l'approvisionnement en bois de chauffage par voie d'extraction de la végétation — en voilà les facteurs essentiels [Iran... , 1977].

Les environs de Yezd, Kerman, Katañz, Tabas, Kichan, Abwâz, Sabzawar sont les plus exposés à la désertification.

La première tentative de la lutte contre les sables mouvants en Iran à été entreprise encore en 1945, mais une large offensive contre les sables mouvants n'a été lancée qu'en 1965-66, après l'initiation des spécialistes iraniens à l'expérience des travaux de fixation des sables en URSS, et au Pakistan [Niknam, Ahranjani, 1976].

La fixation et le boisement des sables mouvants, le rétablissement du potentiel économique des terres désertifiées et leur réintégration sont planifiées et réalisées dans les régions intérieures du pays par massifs isolés sur la base de programmes autonomes. Les préparatifs tiennent compte du volume des travaux de fixation et des opérations sylvicoles et prévoient, de manière obligatoire, l'aménagement de pépinières sylvicoles pour produire des plants au système radical fermé et ouvert, la construction de locaux de production, l'approvisionnement en eau, etc. La fixation des sables mouvants se fait par l'aménagement de protections mécaniques ou par l'enduction de la surface sableuse par des liants.

Le programme des travaux de fixation des sables par protections mécaniques prévoit avant tout la protection des agglomérations, voies de communication et champs contre l'ensablement.

Les travaux commencent par la fixation de la surface sableuse. Les schémas de l'installation des protections mécaniques varient en fonction des conditions locales, de l'intensité de l'érosion, etc. Après la fixation initiale, toute la surface fait l'objet d'opérations sylvicoles manuelles. On utilise pour la plantation des espèces ligneuses: plantes fixatrices appartenant à la flore locale: *Haloxylon aphyllum* le plus souvent.

Les brins plantés sont arrosés au cours de la première végétation d'une à trois fois en fonction des conditions locales. L'arrosage se poursuit parfois au cours de la deuxième végétation. L'eau pour l'arrosage est acheminée par des réservoirs spéciaux. On utilise pour les opérations de reboisement des plants de haute qualité. Ce sont des plants au système radical fermé, cultivés dans des sachets de polyéthylène dans une pépinière arrosée.

Les programmes de la fixation des sables mouvants prévoient le boisement, dans les régions où les conditions y sont favorables, par semis de graines de plantes ligneuses et herbacées. Mais le procédé de boisement par semis est moins fructueux que la plantation.

Vers le milieu des années 1970, la superficie des territoires soumise à la fixation à l'aide de protections mécaniques s'est chiffrée par 330 000 ha, ce qui a permis d'améliorer environ 3 millions d'ha de pâturages.

La mécanisation des travaux de fixation s'est avérée possible grâce à l'utilisation de liants chimiques. Cette méthode est considérée comme une orientation autonome dans la fixation des sables. Les recherches dans ce domaine ont débuté en 1968 et ont été suscitées par la nécessité de fixer les sables mouvants sur de vastes territoires pour protéger certaines routes et chemins de fer. C'est l'émulsion de bitume qui a été utilisée comme liant. Son épandage sur la surface sableuse se fai-

sait par des machines spéciales aménagées sur des tracteurs à chenilles ou des traîneaux tirés par des tracteurs. La norme de consommation du liant est de 3 à 4 tonnes par hectare. La fixation de la surface sableuse par l'émulsion de bitume se fait en règle générale sur les terrains où le semis de graines (*Haloxylon aphyllum*, *Calligonum*) ou la plantation de plants ont été effectués au préalable.

La fixation, des sables et le boisement accompagnés de l'utilisation de liants chimiques donnent de bons résultats. Ce procédé a permis de fixer et de boiser en Iran vers 1976 les sables sur une superficie de 58000 ha [Niknam, Ahranjani, 1976].

Tous les terrains soumis à la fixation ou au boisement sont gardés par des contingents paramilitaires et l'activité économique y est interdite. Les mesures de protection garantissent un développement régulier des plantations et contribuent au rétablissement naturel de la végétation sur les terrains soumis à l'amélioration.

Le programme de la fixation des sables mouvants prévoit la création d'une ceinture verte autour des déserts à l'est et au centre de l'Iran sur une superficie de 2,5 millions d'ha [Iran., 1977]. En 1977, *Haloxylon*, *Tamarix* et *Calligonum*, ainsi que d'autres plantes ont couvert 137000 hectares, le saxaoul — 248000 ha, des bandes de protection ont été créées d'une longueur de 6000 km, 534 ha ont été aménagés pour pépinières. 2,5 millions d'ha de terres arides exposées à la dégradation sont surveillées afin de protéger le sol et la couverture végétale [Conservation. . . , 1977].

L'Afghanistan, le Pakistan, l'Inde et la Turquie présentent des conditions écologiques semblables et souffrent à peu près dans la même mesure que l'Iran du danger de la désertification.

Le territoire de l'Afghanistan, exception faite de quelques petites régions à l'est et au nord-est, est exposé à la désertification. Les pâturages occupent 62 % du territoire du pays (40 millions d'ha). Le pacage non-contrôlé de 30 millions de têtes de bétail contribue à la dégradation de la couverture végétale et des sols. L'altération des sols est accélérée par l'extension de l'agriculture à sec et la coupe du bois (jusqu'à 10000 hectares par an) [Problems. . . . , 1983].

Les cadences de formation des sables mouvants ne sont pas connues jusqu'à présent, mais leur superficie au nord du pays est considérable. Les sables de barkhanes s'étendent sur des centaines de kilomètres le long de la frontière avec l'URSS. Selon nos observations de terrain, leur formation est provoquée par l'anéantissement de la végétation et la déflation des dépôts alluviaux quaternaires de l'Amoudaria. Le relief de sables de barkhanes varie en fonction de la situation géographique. Le long du cours de l'Amoudaria, les massifs de sables de barkhanes sont formés par des chaînes de hautes barkhanes à dénivellation de 10 à 15 m. Au fur et à mesure de l'éloignement vers le sud, l'épaisseur des dépôts éoliens diminue. A la frontière des dépôts alluviaux de piémont, les barkhanes ont la forme de manteau et varient en épaisseur de 0,3 à 2 à 3 m.

Dans les lieux de déflation des dépôts de sable, la ségrégation des sables est faible. La couleur grise et la présence de mica témoignent d'un traitement éolien insuffisant. Sur les terrains périphériques, le sable est bien trié par le vent, enrichi de particules de poussière et partiellement salin.

À présent, des travaux de fixation des sables sont déployés en Afghanistan afin d'en protéger les ouvrages d'intérêt économique et, surtout, les routes. La méthode appliquée est la fixation de la surface sableuse par l'argile. Elle est réalisée par le déplacement mécanisé du sol argileux et son épandage sur la surface sableuse par des bulldozers. On prévoit également l'utilisation d'agents chimiques pour prévenir la déflation à proximité des ouvrages.

Le Pakistan connaît quelques problèmes liés à la désertification et, en particulier, à l'érosion par le vent et par l'eau dans les régions de l'agriculture à sec et à l'érosion éolienne dans les sables. Les facteurs, les processus et l'échelle de la désertification varient d'une région à l'autre et sont déterminés par les conditions physiographiques, nombre d'habitants et de têtes de bétail et le système de la culture de la terre.

La désertification des terres arides progresse en Inde où 45 % de ces terres sont labourables et où la coupe du bois de feu est très intense. Il est admis que dans le désert de Thar où la coupe du bois de feu a déjà atteint 3 millions de tonnes en 1971, toute la végétation sera anéantie dans 60 ans. C'est pourquoi des tentatives ont été entreprises de secourir à la situation par le boisement artificiel dans trois États: Râjasthan, Haryana et Gujerât situés dans la zone aride.

Il est à noter que dans la partie occidentale de l'État de Râjasthan (superficie totale de 21,4 millions d'ha), les sables mouvants et semi-fixés de types différents occupent près de 13 millions d'ha.

Les travaux de fixation des sables mouvants et du boisement datent en Inde de 1952 où le gouvernement a créé à Jodhpur une station sylvicole désertique transformée en 1957 en station de reboisement des déserts et de la protection des sols, et en 1959 — en Institut central de recherches scientifiques pour la zone aride (CAZRI). Parmi les objectifs primordiaux de ces centres de recherche se trouvaient l'étude des conditions physiographiques du désert de Thar, l'élaboration des méthodes de boisement des sables mouvants et d'amélioration des pâturages dans les déserts, ainsi que la création de bandes forestières de protection et l'aménagement d'espaces verts dans les établissements humains du désert.

En 25 ans, dans toutes les régions du désert de Thar ont été essayées des plantations de 112 essences d'Eucalyptus, de 65 essences d'Acacia et de 82 essences d'autres plantes provenant des pays d'Amérique et de l'Australie.

En fonction des conditions sylvicoles, l'Institut central de recherches pour la zone aride (CAZRI) recommande, sur la base des travaux accomplis, les espèces ligneuses suivantes:

1. Pour les sols sableux épais — Acacia tortilis, Prosopis juliflora,

P. cineraria, *Albizzia lebbek*, *Azadirachta indica*, *Tecomella undulata*, *Eucalyptus melanophloia*, *E. camaldulensis*, *E. terminalis*, *E. hybrid* et d'autres.

2. Pour les sols alluviaux de faible épaisseur — *Azadirachta indica*, *Prosopis juliflora*, *Albizzia lebbek*, *Acacia nilotica*, *A. tortilis*, *Eucalyptus terminalis*, *E. camaldulensis*, *E. sideroxylon* et d'autres.

3. Pour les espaces sableux et pierreux — *Acacia tortilis*, *A. senegal*, *Azadirachta indica*, *Prosopis juliflora*, *Anogeissus rotundifolia*.

4. Pour les espaces caillouteux — les mêmes espèces que dans le point 3.

5. Pour les dunes de sables mouvants — *Acacia tortilis*, *A. senegal*, *Prosopis juliflora*, *P. cineraria*, *Calligonum polygonoides*, *Parkinsonia aculeata*, *Albizzia lebbek* et d'autres.

6. Pour les espaces halomorphes (fortement salins) — *Acacia tortilis*, *Prosopis juliflora*, *Salvadora oleoides*, *S. persica*, *Tamarix arilata* et d'autres.

Les procédés techniques de fixation des sables mouvants d'après les résultats des travaux de recherche du CAZRI sont les suivants:

1. Protection des dunes contre les facteurs biotiques par la construction de clôtures.

2. Protection des dunes exposées à la déflation par l'aménagement de protections mécaniques alignées ou réticulaires à l'aide des arbrisseaux d'origine locale; les protections descendent de la crête jusqu'au pied de la dune servant de brise-vent.

3. Création d'une couverture végétale artificielle par plantation ou replantation de plants d'espèces végétales locales ou introduites cultivées en pots de glaise ou en conteneurs spéciaux.

4. Plantation de brins ou semis de graines d'herbes et de *Palma-Christi* du côté sous le vent des protections mécaniques.

5. L'entretien correct et régulier des protections jusqu'à l'échéance de la période de retour des investissements (10 à 15 ans).

Construction de clôtures. Les clôtures sont faites de barbelé fixé sur des pieux en cornière d'acier espacés de 6 m.

Les clôtures peuvent être faites d'arbrisseaux épineux du type *Zizyphus nummularia* à condition que l'on en trouve suffisamment dans la région.

Protections mécaniques à base d'arbrisseaux. On recourt aux espèces arbustives suivantes: *Crotalaria burhia*, *Leptodenia spartium*, *Zizyphus nummularia*, *Aeruva psudotomentosa*, *Calligonum polygonoides*, *Panicum turgidum*. Les arbrisseaux sont coupés sur place et enfoncés dans la terre verticalement, les cimes en bas, en rangées espacées de 2 à 5 m afin de décélérer le vent sur la surface dunaire.

Aménagement d'une couverture végétale. En fonction de la pluviométrie, on recommande pour la fixation des dunes les espèces ligneuses et herbacées suivantes:

1. Zones à pluviométrie de 150 à 300 mm.

Arbres: *Prosopis juliflora*, *Acacia tortilis*, *A. senegal*.

Arbrisseaux: *Calligonum polygonoides*, *Zizyphus* sps.

Herbes: *Lasiurus indicus*.

2. Zone à pluviométrie de 300 à 400 mm.

Arbres: *Acacia tortilis*, *A. senegal*, *Prosopis cineraria*, *P. juliflora*, *Tecomella undulata*.

Arbrisseaux: *Zizyphus* sps., *Calligonum polygonoides*, *Ricinus Communis*.

Herbes: *Cenchrus ciliaris*, *C. setigerus*, *Lasiurus indicus*, *Saccharum munja*.

3. Zone à pluviométrie dépassant 400 mm.

Arbres: *Prosopis cineraria*, *P. juliflora*, *Acacia nilotica*, *A. senegal*, *A. tortilis*, *Tecomella undulata*, *Parkinsonia aculeata*, *Ailanthus excelsa*, *Albizia lebbek*.

Arbrisseaux: *Cassia auriculata*, *Ricinus communis*, *Zizyphus* sps.

Herbes: *Cenchrus ciliaris*, *C. setigerus*, *Panicum antidotale*, *Saccharum munja*.

Afin de protéger les ouvrages d'intérêt économique, des méthodes et des procédés appropriés de boisement et de fixation des sables ont été mis au point pour différentes conditions sylvoicoles: sables mouvants, sols pierreux et pâturages, afin d'améliorer les pâturages et approvisionner la population locale en bois de feu.

Les travaux d'aménagement d'espaces verts dans les agglomérations et de bandes boisées de protection se sont soldés par un succès. Les bandes de protection formées d'*Acacia nilotica* et de *Dalberdia sissoo* ont été aménagées à Suratcharkh sur une distance de 102 km. Dans différentes parties du désert de Thar, des bandes boisées de protection ont été aménagées sous forme d'allées sur 200 km le long des chemins de fer. Les plantations d'*Acacia tortilis* s'étendent sur des centaines de kilomètres en Haryana et Gujerat. Un vaste programme de boisement est adopté pour les années 1980—1985 qui prévoit d'aménagement dans les déserts des plantations d'arbres pour bois de feu sur une surface de 5 000 ha, la fixation des sables mouvants sur une superficie de 7 100 ha, la plantation de 2 millions d'arbres pour bois d'œuvre destiné à la construction sur une surface de 5 200 ha, la création de plantations mixtes.

Il est prévu de créer dans la zone du canal de Râjasthan une bande boisée de protection longue de 75 km, d'aménager des espaces verts sur 500 ha, de planter des arbres pour bois de feu sur 300 ha et de boiser 4 000 ha de sables mouvants [Mann, 1981].

En Turquie, ce sont les terres de la partie méridionale de l'Anatolie Centrale (province de Konya) et des régions côtières qui sont exposées à la désertification. La superficie totale des terres attaquées par l'érosion fait 466 000 ha. Dans les régions centrales, les sables mouvants occupaient en 1966 430 000 ha, leur formation étant liée à la déflation de dépôts lacustres.

Les travaux d'amélioration des sables mouvants datent de 1960. A l'an 1962, sur tout le territoire exposé à la désertification, des clô-

tures de roseaux hautes de 1,5 m et espacées de 30 à 50 m ont été installées.

La fixation des sables mouvants par un système de clôtures de roseaux a marqué une première étape de la fixation de la surface sableuse. Le semis d'herbes se faisait sous la couverture de ces protections. La plantation d'arbres adaptés aux dures conditions locales représentait l'étape suivante de la fixation. La croissance des végétaux ligneux mettait le point final à la fixation des sables mouvants. En 1981 la superficie des terres améliorées était égale à 300000 ha.

Les sables fixés sont largement intégrés à la production agricole, en particulier pour l'agriculture à sec et l'intensification de l'agriculture irriguée pour le compte de la nappe phréatique. 3000 puits ont été déjà forés à cette fin [Blooming desert, 1981].

De grands travaux d'amélioration des terres désertifiées et des sables mouvants sont planifiés et mis en œuvre en Chine.

La superficie totale des déserts de la Chine fait 1 095 mille km², dont les déserts sableux couvrent 647000 km² et le reste tombe sur les déserts pierreux.

Les plus grands déserts et massifs sableux sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3

Superficie des déserts sableux de la Chine

Déserts et massifs sableux	Superficie en % de la superficie des déserts du pays, y compris le désert de Gobi	Déserts et massifs sableux	Superficie en % de la superficie des déserts du pays y compris le désert de Gobi
Takla-Makan	47,3	Le massif sableux de Maouso	4,5
Kourbantongut	6,8	Koumtag	3,2
Badan-Djareng	6,3	Le massif sableux Khoichantag	3,0
Tengri	6,0	Kouzouptchi	2,3
Le massif sableux Kertsing	5,9	Oulanpoukhé	1,4
Les déserts de la dépression de Tsaidam	4,9	Le massif sableux Khouloumber	0,7

Les chaînes de dunes sont typiques du modèle éolien et érodé des déserts chinois. Les plus grandes chaînes de dunes sont concentrées dans les déserts de Takla-Makan et Kourbantongut. Les sables mouvants couvrent plus de 65 % de la superficie du relief dunaire. La direction prédominante de leur migration est vers le sud-est, ce qui est dû aux vents du nord-ouest. Parmi ces régions, citons la partie sud-ouest du

désert de Takla-Makan, le sud-est du Koumtag, les déserts de la dépression de Tsaidam, les déserts Kourbantongut, Badan-Djareng, Tengri, Oulanpoukhé, Kouzouptchi, les massifs sableux Maoussou, Khoichantag, Khououlounber et la partie nord-ouest du massif sableux de Kertsing.

Les dunes soumises à l'action des vents du nord-est sont transportées vers le sud-ouest. Ceci est typique pour la majeure partie de la cuvette du Tarim et les régions à l'ouest du fleuve Houang-ho. La migration des dunes vers le nord-est est relevée dans la partie est du massif sableux de Kertsing et dans les régions sud-est de la Chine.

Pour la lutte contre la déflation et l'ensablement, on recourt, en Chine, aux méthodes de phytoamélioration. Pour la fixation des sables mouvants, on y ajoute différents genres de revêtements.

Les travaux suivent trois orientations principales:

1. Fixation et utilisation agricole des sables à proximité des oasis et des agglomérations.

2. Fixation des sables le long des routes et des chemins de fer.

3. Prévention du transport frontal du sable.

Aux confins des oasis, là où la hauteur des dunes ne dépasse pas 10 m et il y a des couloirs interdunaires, on aménage des protections sous forme de bandes boisées ou d'espaces verts peuplés de *Populus cupidata*, en qualité de l'essence ligneuse, et d'*Elaeagnus angustifolia*, dans les couloirs interdunaires. Leur culture est basée sur l'eau phréatique ou sur l'arrosage. Parfois, on recourt, pour la fixation des sables mouvants situés entre les espaces verts, aux protections mécaniques sous forme de terreau composé d'un mélange d'argile, de paille, de gravier, etc.

Pour la fixation des sables mouvants dans les oasis des zones marginales, on pratique la plantation d'espèces ligneuses avec *Tamarix ramosissima*. Les observations faites dans la région sud-ouest du Takla-Makan montrent que l'arbrisseau du type *Tamarix chinensis* retient environ 80 % du sable aux vitesses du vent moyennes.

Les bandes formées d'espèces arbustives peuvent atteindre une largeur de 300 à 500 m.

La gamme de plantes fixatrices du sable varie d'un désert à l'autre. Ainsi, dans les oasis situés à la frontière des déserts de Hin-yang, ce sont les *Populus bolleana*, *Elaeagnus angustifolia* et *Ulmus pumila* qui sont considérés comme espèces ligneuses les plus appropriées pour la fixation des sables, et, parmi les arbustes c'est le *Tamarix chinensis*.

Dans le désert d'Oulanpoukhé prévalent les *Salix matsudana*, *Populus simonii* et *Elaeagnus angustifolia*, dans le couloir de Hexi, les espèces ligneuses *Populus cupidata* et *Elaeagnus angustifolia* à côté de l'espèce arbustive *Haloxylon ammodendron*.

Les résultats des expériences de nombreuses années montrent que le meilleur effet de fixation est assuré par la mise en œuvre conjointe de plusieurs espèces végétales. L'expérience effectuée dans les sables de Maoussou a montré que les plantations de *Salix cheilophila* et de *Salix matsudana* dans les fossés interdunaires forment des espaces boisés sur

les versants sous le vent des chaînes de dunes et des barkhanes empêchant l'avancement des sables. On plante *Salix cheilophila* ou *Artemisia ordosica* sur le tiers inférieur des versants au vent. Ces plantations attirent les dunes vers soi en décélérant le courant de sable près du sol et diminuent ainsi le volume de sable transporté par le vent. Cette méthode est connue en Chine sous l'appellation «courir après le vent et chasser le sable à l'aide de la végétation».

Une autre expérience intéressante est la fixation des sables dans la région de Shabodou par des espaces boisés créés sur des terrains arrosés par les eaux du Houang-ho. Des arbres y sont cultivées à côté d'espèces arbustives: *Robinia pseudo-acacia*, *Eleagnus angustifolia*, *Populus cupidata*, *Hedyseoparium*, *Caragana Korshinskii*, *Salix cheilophila*. L'importante masse de l'écoulement solide sous forme de limon charrié par le fleuve forme, après l'arrosage, une croûte sur la surface sableuse contribuant ainsi à la fixation des sables.

Une grande attention est accordée en Chine à la protection des routes et des chemins de fer contre l'ensablement. Pour ce faire, des méthodes de phytoamélioration, présentées au tableau 4, y ont été mises au point en fonction des conditions lithoédaphiques.

Tableau 4

Méthodes de fixation des sables mouvants appliquées à la construction des ponts et chaussées et des chemins de fer

Type de paysage	Méthodes de fixation
	Chemins de fer
Steppes à sables mouvants et à dunes fixées et semi-fixées	Plantation d' <i>Artemisia halodendron</i> , <i>Caragana microphylla</i> sur les crêtes des dunes, de <i>Lespedeza dahurica</i> sur les versants sous le vent, de <i>Salix flavida</i> sur les versants au vent. Cette méthode est connue sous l'appellation «Arbre dû sur la place due»
Déserts à sables mouvants de grande étendue	La création le long des voies ferrées de protections mécaniques réticulaires de paille de largeur de 500 m avec la plantation de <i>Hadysarum Sciparium</i> , de <i>Calligonum mongolicum</i> et de <i>Salix flavida</i>
Zones arides et Gobi où le transport du sable présente un danger grave	Aménagement de bandes boisées en <i>Populus cupidata</i> , <i>Eleagnus angustifolia</i> et <i>Salix cheilophila</i> (arrosage fréquent)
	Routes
Déserts	Bandes boisées en <i>Artemisia ordosica</i> et <i>Salix cheilophila</i> . Quadrillage mécanique. Revêtement en gravillon ou en plaques de sel

La prévention du transport de sable pendant les travaux de construction est effectuée par des ceintures de protection. Elles sont aménagées en règle générale par la plantation de *Salix mongolica* et de *Tamarix juniperina* suivant les contours des dunes. Là où la stabilisation des

sables est nécessaire, on utilise des protections faites en matériaux d'origine végétale, branches de plantes disposées en bandes espacées de 1 m ou en carreaux de 1×1 m. Sur les terrains ainsi fixés, on sème *Artemisia ordosica* à raison de 500 g/ha.

Nous allons citer à titre d'exemple les travaux de fixation des sables dans le Sin-Kiang, où les déserts occupent un territoire de 321 000 km² dont 2/3 sont représentées par de grosses formations de chaînes de bar-khanes. Pour protéger les terrains exposés à l'érosion, des plantations d'arbres ont été aménagées dans la région sur une distance de 300 km et larges de 500 m, ce qui a permis de protéger 450 000 ha.

D'importants travaux d'amélioration ont été entrepris en Mongolie Intérieure où 34 % du territoire sont envahis par les sables mouvants. 240 000 ha ont été fixés dont 210 000 ont été transformés en pâturages.

Il n'a pas été publié de données concernant l'utilisation de liants chimiques pour la fixation de la surface sableuse en Chine [China. . ., 1977, Combating. . ., 1981].

En Israël, la surface occupée par les dunes fait 130 000 ha. La lutte contre les dunes côtières utilise la technique de création et de fixation d'une dune antérieure (on aménage parfois 2 ou plus de dunes antérieures espacées de 50 à 100 m).

C'est l'*Ammophyla arenaria* qui est généralement utilisée pour la fixation des dunes antérieures. Les espaces interdunaires sont fixées par le semis d'herbes en combinaison avec l'épandage d'une émulsion aqueuse. Pour le semis, on utilise les graines d'*Ammophyla arenaria*, *Agropyron junceum*, *Oenophera drummond*, etc.

Les semences tombent sur octobre-novembre, quand vient la saison des pluies d'hiver. Le seigle et l'orge sont souvent semés par bandes et sont ensuite remplacés par des plantes vivaces à croissance lente. L'*Agropyron junsum* permet une utilisation contrôlée des plantations en qualité de pâturages. Les bandes boisées de protection sont créées dans ces régions par la plantation de *Saccharum biflorum* et *Acacia cyanophylla*. L'*Acacia* est planté dans les endroits non influencés par l'eau salée.

Les dunes continentales sont fixées par *Calligonum*, *Jucla*, *Agave*. Le cas échéant, la surface sableuse est fixée par des liants.

La fixation des sables en tant que l'une des mesures efficaces de prévention de la désertification est pratiquée aussi dans certains pays d'Afrique du Nord et de la bande Sahel-Soudan. Il est à souligner que les problèmes de l'amélioration des dunes côtières et continentales sont très spécifiques.

Malgré la même orientation générale des voies de solution du problème, les techniques, ainsi que les plantes fixatrices, diffèrent d'un pays à l'autre.

Les travaux de fixation des sables et de création de bandes de protection destinées à prévenir l'érosion sur le littoral océanique du Sénégal, sont précédés de recherches au cours desquelles on étudie en détail les conditions d'habitat et de climat, l'infrastructure et on aménage des pépinières.

Les mesures de protection commencent d'ordinaire par l'aménagement d'une dune côtière antérieure à une distance de 60 à 70 m de la hauteur maximale de la marée haute. L'aménagement de la dune précède de 5 à 8 mois le début des travaux de fixation proprement dits.

A une distance de 20 à 25 m de la première dune, on prévoit des bandes de protection dont l'espacement de rangées dépend de la raideur de la pente. Leur longueur varie de 260 à 3000 m. Les bandes de la première zone sont orientées entre 42 et 45° pour les vents de direction latitudinale. La protection préalable du terrain contre la déflation est assurée par des protections recouvrantes ou réticulaires (2,5×2,5 m) en matériau végétal, parfois aussi par des protections verticales en matière synthétique, qui sont mises en place en octobre-novembre. Les bandes de protection sont constituées de plants au système radical fermé, par exemple *Eucalyptus Anacardium* [Fixation. . ., 1981].

En Libye, les dunes mouvantes couvrent d'énormes superficies dans la région côtière, ainsi qu'à l'intérieur du pays (250 000 ha). Elles s'étendent en bande depuis la frontière tunisienne, à l'ouest, en passant par la région de Missourat jusqu'à Ajdabie, à l'est. A présent, le gros du territoire couvert de dunes côtières est mis en valeur.

On recourt à deux méthodes de fixation des sables côtiers et continentaux:

1. Stabilisation de la surface sableuse par l'aménagement de protections mécaniques en matière végétale.

2. Fixation de la surface sableuse par des liants: pétrole brut, émulsion de bitume, émulsion de caoutchouc synthétique, de pétrole et d'eau. Après la fixation mécanique des sables, on passe, en règle générale, à la fixation «biologique» par des plantes ligneuses. Les protections mécaniques sont mises en place à la main. Des plantes desséchées sont enfoncées par rangées dans le sol à la profondeur de 15 cm, leur hauteur au-dessus du sol étant d'environ 35 cm. Les clôtures réticulaires à enceintes de 5 m² sont utilisées sur les pentes abruptes des dunes composées de sable grossier et de 16 m² sur les pentes douces composées de sable fin. Pour fixer la surface sableuse, on plante *Artemisia herba-alba*, *Retoma raetam*, *Palm fronds*.

Comme matériaux pour les protections, on utilise *Imperata cylindrica*, *Aristida pugins*, *Retama retam* et les rameaux de palmier.

Les matériaux d'origine végétale sont devenus déficitaires dans le pays à cause de l'extension des travaux de fixation, ce qui a obligé de rechercher d'autres possibilités de fixation des sables mouvants. Depuis 1961, une méthode physico-chimique s'est très largement répandue dans le pays, en l'occurrence la fixation par des produits pétroliers.

La technologie de la fixation de la surface sableuse est relativement simple. L'épandage des produits pétroliers est effectué au moyen d'un équipement approprié qui se compose d'une citerne de 12 m³ montée sur un traîneau, d'un moteur et de buses à pulvériser. L'appareil est tiré par un tracteur à chenilles. Avant l'épandage, les liants sont chauffés à 45 °C. La dispersion se fait à travers les buses à pulvériser et couv-

re une bande large de 20 m avec un débit de 4 t/ha. Cette méthode permet de fixer 25 ha de sables par jour. La pulvérisation des liants par des avions a été également pratiquée.

La pulvérisation de pétrole brut permet de créer sur la surface une croûte épaisse de 0,5 cm d'une longévité de 3 ans.

Pour la fixation de la surface sableuse par le pétrole, on n'en utilise que des variétés non-toxiques, c'est-à-dire celles qui n'exercent pas d'influence négative sur la prise, la croissance et le développement de la végétation. Des expériences de pulvérisation de produits pétroliers à partir de l'avion ont été montées.

Les plantations de protection sur les terrains fixés par des liants sont faites par plantation de brins au système radical fermé. L'âge recommandé des plants est de 6 à 10 mois, et la plantation a lieu d'habitude en novembre-décembre, où les sables sont arrosés par les précipitations atmosphériques jusqu'à une profondeur de 40 cm. Avant la plantation, les racines de plants placées dans des conteneurs individuels sont plongées dans l'eau, ce que assure une réserve d'humidité nécessaire pour la survie normale des plantes pendant la première période de leur développement.

Dans les conditions du pays, le semis est considéré inefficace.

Pour la fixation des dunes continentales, on plante *Acacia cyanophylla*, *A. cyclops*, *Eucalyptus Camaldulensis*, *E. gomphocephala*, *Tamarix articulata*.

Les plantations mixtes composées de 40 % d'acacia et de 60 % d'*Eucalyptus* sont considérées comme les plus efficaces.

Le nombre de plantes par hectare dépend de la situation géographique, des conditions climatiques et des espèces choisies et varie entre 500 et 1 000 [Désertification . . . , 1977].

Les travaux d'amélioration des terres de grande échelle mettant en jeu la même technologie de fixation de la surface sableuse et les mêmes techniques agricoles sur les bandes de protection se font sur les sables côtiers de l'**Egypte**, de la **Tunisie**, de l'**Algérie** et du **Maroc**.

Pour le rétablissement de la couverture végétale des massifs sableux continentaux des pays d'Afrique du Nord, les espèces ligneuses et herbacées suivantes sont recommandées:

a) Espèces ligneuses: *Tamarix aphylla*, *T. stricta*, *T. articulata*, *T. gallica*, *T. africana*, *Eucalyptus woddwardis*, *E. oleosa*, *E. occidentalis*, *E. astringens*, *E. tronquata*, etc., *Caligonum arel*, *C. arich*, *C. arborescens*, *Haloxylon persicum*, *H. aphyllum*, *Ricinus communis*, *Saccharum spontaneum*, *Casuarina equestriifolia*.

b) Graminées xérophiles: *Panicum antidotale*, *P. turgidum*, *Aristida pennata*, *A. kareliana*.

c) Arbustes xérophiles: *Retama raetam*, *Atriplex halimus*, *Leptanion protechnica*, *Ochradenus baccatus*, *Salvadora persica*, *Genina saharae*, etc.

Les travaux des fixations des sables en Egypte se déroulent dans la « Vallée nouvelle » (Vadi El-Guédid) qui embrasse toute une chaîne de

dépressions-oasis à l'ouest de la vallée du Nil: Kharguèh, Dakhla, Farafra, Bahariya. Ces derniers temps, ces oasis sont menacés d'ensablement du côté nord-est. Le sable arrive dans les oasis en les traversant parfois sous forme de courants de vent mêlés de sable et de formations dunaires avançant à raison de 15 m par an. De grandes surfaces de jardins dans les oasis de Dakhla et Kharguèh sont déjà ensablées [Meckelein, 1980]. Tout porte à croire que la lutte contre les sables mouvants dans la Vallée Nouvelle est irréalisable par les méthodes traditionnelles (aménagement de protections mécaniques ou de bandes boisées de protections sur les terrains fixés) puisqu'on n'y trouve pas de conditions favorables pour la culture des plantes et les protections par clôtures seules se désintègrent très rapidement [Lychagin, 1975]. Même les plantations de protection de *Casuarina equisetifolia*, cultivées sur des surfaces irriguées sont ensablées en quelques années.

En résumant l'opinion des spécialistes [Hagedorn, 1977], disons que l'unique voie de contrôle de la migration des sables est de ne pas implanter d'ouvrages d'intérêt économique sur leur trajet.

Compte tenu de l'importance de la lutte contre les ensablements dans la Vallée Nouvelle, les spécialistes recherchent de nouveaux procédés de réalisation des travaux d'amélioration des terres.

Un projet expérimental prévoit la fixation des sables mouvants par l'aménagement de bandes de protection de *Casuarina* irriguées. Les bandes doivent compter au maximum 3 rangées espacées de 50 à 75 m. La coupe des branches inférieures est obligatoire jusqu'à la hauteur de 1,5 m afin d'ouvrir l'accès au vent sous les arbres pour éviter leur ensablement. Le balayage des bandes par le vent assure le passage libre du sable, qui se dépose au-delà de la bande dans la zone de décélération du vent. On s'attend à ce que les canaux et les rigoles d'irrigation à l'intérieur de la bande seront ensablés très lentement. Selon les estimations, les bandes ne seront pas exposées à l'ensablement pendant 60 ans.

En admettant la hauteur de la bande de *Casuarina* égale à 10 m, on s'attend à ce que son effet amélioratif se propagera sur 50 à 75 m (on estime qu'en Asie Moyenne, les bandes ajourées, laissant le passage au vent, exercent une influence améliorative à une distance égale à 10-12 hauteurs des arbres).

Il est conseillé de fixer le sable accumulé entre les bandes boisées par la végétation naturelle, par exemple par le *Tamarix* qui se développera pour le compte de l'eau phréatique s'infiltrant latéralement des canaux d'irrigation. L'épaisseur de la couche du sable entre les bandes boisées peut atteindre 3 à 4 m.

On prévoit, pour le projet expérimental, 8 bandes boisées de protection, premièrement, pour protéger les oasis contre l'ensablement et, deuxièmement, pour, éventuellement, permettre une mise en valeur agricole des terrains entre les dernières bandes.

La Conférence de l'ONU sur la désertification a examiné en 1977 le Projet multinational de la création de la zone verte en Afrique du Nord

[Transnational. . ., 1977] et dans le Sahel [Sahel. . ., 1977]. La première zone passera par l'Égypte, la Libye, l'Algérie, la Tunisie et le Maroc à la frontière des régions à pluviométrie annuelle moyenne de 150 à 250 mm. Tout un ensemble de mesures de prévention de la dégradation des écosystèmes y est prévu. Ces mesures comprennent la fixation des sables mouvants, la rétention de l'humidité, le boisement, l'amélioration des pâturages, l'organisation convenable de l'élevage et de l'agriculture à sec. La largeur de la ceinture verte dépendra des conditions climatiques et du relief et peut varier de 2-3 à plusieurs dizaines de kilomètres. Les bandes boisées de protection seront aménagées par la plantation et le semis d'*Amophyla* sp., *Haloxylon* sp., *Ricinus communis*, *Acacia cyanophylla*, *A. senegal*, *A. longifolia*, *Eucalyptus gemphocfalia*, *E. camaldulensis*, *Eleagnus angustifolia*, *Tamarix* sp., *Zizyphus spinachrestii*. Dans les régions à pluviométrie annuelle de 300 mm, des espèces de pins supportant bien la sécheresse sont recommandées.

La seconde «Ceinture verte» passera par la frontière sud du Sahara. Cette zone large de 150 à 400 km s'étendra depuis l'océan Atlantique jusqu'à la mer Rouge, elle traversera le Sénégal, la Mauritanie, le Mali, la Haute Volta, le Niger, le Tchad et le Soudan, c'est-à-dire les pays à prédominance de l'élevage de bétail extensif. Les conditions écologiques et socio-économiques des pays de la zone du Sahel sont presque identiques, et tous les pays de cette zone se heurtent aux mêmes problèmes liés à la prévention de la désertification.

Le projet de la Ceinture verte est orienté sur la protection, le rétablissement et l'utilisation rationnelle des ressources fourragères de cette région.

Les formations dunaires sont très répandues dans les déserts de l'Arabie, qui sont considérés comme une «zone-tampon» entre les déserts africains et asiatiques. Elles ont comme source les ergs qui couvrent plus d'un million de kilomètres carrés.

L'ensablement porte un grand préjudice aux champs labourables et aux pâturages, aux routes, aux arbres, aux aéroports et aux autres éléments de l'infrastructure. L'exemple d'El Hasâ, le plus grand oasis de l'Arabie Saoudite et l'un des plus anciens au Moyen Orient, est très significatif pour l'état actuel de la lutte contre l'ensablement. Situé à 60 km à l'ouest du Golfe Persique et à 300 km à l'est de Riyad, capitale du pays, il est long de 30 km sur l'axe nord-sud et large de 20 km. Les sables l'attaquent depuis le désert d'Al-Djâfâr. La situation la plus défavorable s'est créée dans sa partie est où les dunes migrent sur un front de 8 km à raison de 10 m par an sous l'action des vents du nord prédominant.

On utilise, pour la fixation des sables mouvants, des protections en forme de clôtures pleines en feuilles de dattier. En deux ans suivant leur mise en place, elles sont ensablées jusqu'à 2 m de hauteur.

Une méthode plus efficace mais plus coûteuse est celle dite biologique comprenant l'aménagement de haies vivantes (de *Tamarix*) qui atteignent une hauteur de 10 m. Les autres espèces ligneuses poussent bien dans l'ombre de ses branches.

Pour protéger les routes, le revêtement est fait en sol cohérent abondamment mouillé et recouvert de fixateur de sable. Les crêtes des dunes attenantes sont adoucies et fixées dans la mesure du possible par une couche de sol ou par des clôtures en feuilles de palmiers. La distance entre les clôtures est 10 fois supérieure à leur hauteur. Plus tard, on construit une barrière en barbelés délimitant une bande de 400 m bordant la route pour y prévenir le pacage de chameaux et de chèvres.

La plantation de plantes fixatrices commence d'habitude en hiver, après la première pluie. Quelques millimètres de précipitations suffisent pour humidifier les dunes. Il a été établi que 1 mm de pluie humidifie le sable à la profondeur de 2 cm.

On sélectionne pour la plantation des plants de Tamarix âgés de 5 à 10 ans. Avant de procéder à la plantation, les plants gros d'un doigt et longs de 1 m sont défoliés et placés dans l'eau pour 24 h. Une fois plantés dans le sable humidifié par la pluie, ils ne sortent que de 5 cm au-dessus de la surface. Il importe que les plantes prennent bien dans le sable humide et que leurs racines atteignent la nappe phréatique. La distance entre les plantes est de 4 à 6 m. Pour parer à toute éventualité, les brins sont plantés par deux. A l'abri du vent, presque tous les plants prennent, tandis que sur les dunes dégagées, ils sont exposés à l'action du vent et peuvent sécher.

Pour aménager des bandes boisées, on se sert, outre le Tamarix, d'autres espèces ligneuses à croissance rapide. En règle générale, celles-ci sont semées entre les bandes mais demandent un arrosage supplémentaire (Tableau 5) [Achtnich, Homeyer, 1980].

Tableau 5

Espèces ligneuses utilisées pour la fixation
des sables dans le projet El Hasâ

Espèces ligneuses	Hauteur maximale, m	Croissance, cm/an
<i>Acacia cyanophylla</i>	8-10	75-100
<i>Albizia lebbek</i>	9-12	80-120
<i>Casuarina equisetifolia</i>	10-15	75-100
<i>Enealyptus camaldulensis</i>	15-20	150-200
<i>Parkinsonia amleata</i>	5-8	80-120
<i>Prosopis juliflora</i>	8-12	150-200
<i>Tamarix aphylla</i>	8-12	80-150
<i>Tamarix amplexicanlis</i>	5-8	75-100

Des importants travaux de fixation sont entrepris dans la République Populaire Démocratique du Yémen, au sud de l'Arabie.

Les travaux d'amélioration sont concentrés essentiellement dans la zone côtière, où les formations dunaires occupent une zone longue de

1 000 km. Les protections mécaniques — clôtures réticulaires à enceintes de 10×30 m et sortant du sol à 0,5 m — sont très répandues.

Les protections sont installées sur les pentes au vent en 4 à 6 rangées dont les deux premières du côté des vents dominants sont espacées de 5 m.

La longévité des protections mécaniques est de 2 à 3 ans au bout desquels les plantes prennent définitivement de la force et peuvent remplir les fonctions de protection par elles-mêmes.

L'absence de matériaux et le coût élevé des travaux ne permettent pas d'utiliser des agents chimiques pour la fixation de la surface sableuse.

Le boisement des surfaces sableuses fixées se fait au Yémen selon une agronomie spéciale adaptée à la plantation dans les sables aux horizons supérieurs insuffisamment humidifiés. Elle consiste en ce que les systèmes radicaux ou le collet des plants ne sont placés que dans les horizons humidifiés. Le schéma des travaux est le suivant: on déblaye la couche de sable sec et l'on creuse un poquet dans le sable humide où la plante est placée. Si la couche de sable sec est épaisse, on l'évacue à l'aide d'une mèche. Après la plantation, les poquets ou les fouilles sont recouverts de sable sec. Dans les couloirs interdunaires, on plante à la profondeur de 50 cm, sur les pentes au vent, de 80 à 120 cm et sur les crêtes, de 150 cm. Le procédé prévoit un arrosage de recharge obligatoire (10 l par plante) après la plantation. Un arrosage de végétation de 10 l pendant les 2 ou 3 premiers mois est pratiqué au besoin.

Les procédés agronomiques utilisés assurent la prise de 90 % de cultures sur les éléments inférieurs du relief et de 65 % sur les crêtes des dunes.

Les plants sont choisis de manière différenciée. On plante des *Tamarix articulata*, *Acacia tortilis* et *Calligonum comosum* sur les crêtes des dunes de hauteur moyenne. Sur les versants, les *Prosopis juliflora*, *Acacia cyanophylla*, *A. cyclops* et *Parkinsonia aculeata* sont aussi efficaces que le *Tamarix*. Les *Parkinsonia aculeata*, *Tamarix aphylla*, *Aradorachta indica*, *Acacia arabica*, *Salvadora persica* et *Vernonia* sp. poussent très bien dans les fossés.

L'aménagement de bandes boisées de protection s'est considérablement répandu au Yémen au cours de la dernière décennie. Les expériences effectuées ont montré que les bandes étroites (de 1 à 3 rangées espacées de 3 à 4 m) sont les plus efficaces.

Les bandes boisées de protection peuvent se composer des espèces ligneuses suivantes: *Conacarpus lancifolius*, *Casuarina equisetifolia*, *Dalbergia sissoo*, *Azadirachta indica*, *Eucalyptus camaldulensis*, *Terminalia catapa*, *Parkinsonia aculeata*, *Zizyphus spina-christi*, *Tamarix articulata*.

Le Houerou (1976) a dressé la nomenclature suivant des plantes ligneuses utilisées en Afrique du Nord et au Proche et Moyen Orient en tant que fixatrices de sable.

Afrique du Nord, Proche Orient	Moyen Orient, Asie Centrale (région Irano-Touranienne)	Afrique du Nord
Pluviométrie		
100–250 mm/an		200–400 mm/an
Calligonum arich	Calligonum arborescens	Eucalyptus oleosa
C. azel		
C. comosum	C. caput medusae	E. sargentii
Acacia aneura	C. polygonoides	E. endesmioides
A. ligulata	C. eriophorum	E. gongylocarpa
A. salinica	C. comosum	E. kingsmillii
A. sowdeni	Salsola Richteri	E. woodwardii
A. pence	S. Paletskiana	E. gillii
A. victoriae	Ammondendron connollyii	E. intertexta
	Caragana microphylla	E. stricklandii
	C. Korshinskii	E. lesoueffii
	Haloxalon persicum	E. gracilis
	Haloxalon persicum	Acacia cyanophylla
	H. ammodendron	A. cyclops
	H. ophyllum	

Une nomenclature plus large de plantes utilisables pour la fixation et le boisement des sables est citée par l'académicien M. Petrov [Petrov, 1973] (voir «Annexe»).

Les déserts de l'Afrique australe sont confrontés au problème de la lutte contre les dunes côtières et continentales.

Pour lutter contre les dunes côtières, on recourt à la méthode des dunes antérieures afin d'arrêter le sable venant du côté de l'océan. Pour ce faire, on aménage, parallèlement à la côte et dans le sens perpendiculaire au vent, plusieurs chaînes de dunes hautes de 10 à 12 m. D'habitude, on forme ces dunes à 100 m du point le plus haut de la marée haute [Heatland. . ., 1974].

Les dunes antérieures ont à leur base des haies de pieux, de planches ou de matériaux d'origine végétale hautes de jusqu'à 2 m. Après l'ensablement des protections, on en aménage de nouvelles autour desquelles le sable s'accumule de nouveau et ainsi de suite, jusqu'à la formation d'une dune de hauteur voulue.

Ces derniers temps, les dunes sont formées par la plantation d'Acacia qui sont plantées en bande large de 30 à 60 m parallèlement à l'axe central de la dune. Le sable est arrêté par l'herbe qui pousse avec l'accumulation du sable.

Pour stabiliser la surface sableuse, on utilise des terreaux d'origine chimique.

La fixation des dunes formées est effectuée par les herbes: *Psamma arenaria*, *Ammophylla arenaria* et *Ehrharta gigantea*. *Psamma arenaria* est plantée dans le sable meuble et *Ehrharta gigantea* entre les dunes à l'abri du vent. *Ammophylla arenaria* est semée en carreaux de 1x1 m à une profondeur de 40 à 45 cm. *Ehrharta gigantea* est semée d'habitude avec les graines d'*Acacia cyclops* et d'*A. saligna*. Les graines sont mélangés à raison de 3 kg d'herbe + 2 kg d'*Acacia*. Dans des conditions favorables, ils germent au bout de 2 ou 3 semaines.

Après la fixation des dunes, l'*Ammophylla arenaria* commence à disparaître et les fonctions de protection reviennent aux arbres. Les plantations créées sur les dunes ne remplissent que les fonctions de protection.

Les sables mouvants occupent de vastes zones en Australie le long des cours d'eaux temporaires et sur le littoral.

La méthode de fixation des sables côtiers est semblable à celle que l'on applique en Afrique australe et prévoit l'aménagement et la fixation de dunes antérieures et le boisement sous leur protection des sables mouvants attenants.

La dune antérieure peut être formée par des obstacles en forme de haies, par des protections mécaniques ou bien peut être remblayée par des bulldozers.

Après la fixation préalable de la surface de la dune formée, on y plante des plantes vivaces: *Acacia sorphorae*, *Osteopermum monoliferum*, etc.

Pour la fixation préalable des dunes antérieures, on utilise des agents de terreausage chimiques.

Les travaux d'amélioration concernant les dunes continentales ont pour l'objectif d'élever la productivité des pâturages. On y sème à ces fins *Trifolium subterraneum* et on contrôle les populations de lapins et de kangourous [Heathland. . ., 1974].

Aux Etats-Unis, le plus grand danger provient des dunes de la côte de l'Atlantique et du Pacifique. La lutte contre le transfert de sable et la migration des dunes est menée par l'aménagement de dunes artificielles orientées perpendiculairement aux vents principaux avec leur fixation ultérieure par le quadrillage et le semis d'herbes. Pour protéger les ouvrages les plus importants, on utilise le terreausage de gravier. Sur la côte du Pacifique, on plante l'*Ammophylla arenaria* qui sert de base et disparaît après la stabilisation du sable. Aussi, plante-t-on en même temps le *Cytisus scaparius* et le *Pinus contortus*. Sur la côte de l'Atlantique, pour la fixation des dunes, on utilise l'*Ammophylla*, l'*Elymus giganteus* et le *Panicum amarum*.

Pendant le second ameublissement des sables, on se sert d'engrais composés pour garantir la croissance des plantes. Là où le transfert de sable est particulièrement intense, la fixation de la surface est effectuée par l'herbe, ainsi que par des agents chimiques.

Dans l'Etat de Michigan, d'importants travaux sont effectués dans le domaine de l'aplanissement des dunes et de la mise en circuit agricole

de 4 millions d'ha. Pour mettre en valeur des sols sableux, on a utilisé la méthode de blindage: une couche fine et continue de bitume est formée à la profondeur de 60 cm de la surface, ce qui permet de retenir l'humidité dans la zone habitée des racines et garantit la transformation des sables en terres de haute productivité.

Les dunes continentales sont fréquentes dans les Etats d'Arizona, de Colorado, de Nevada, de Kansas, de Utah et de Nouveau Mexique. Ces terres sont en partie touchées par les travaux agricoles. Parfois, la culture provoque l'apparition de sables mouvants (Etats de Kansas, de Nebraska) ensablant les fermes et rendant les terres incultes. Une technologie spéciale d'exploitation et de traitement des sols mise au point par le Service de la protection des sols des USA a permis d'en réhabiliter la majeure partie.

Sur les terres non-cultivées, on sème des graminées, à savoir l'Angropogon hallii et l'Eragrostis trocidis, en qualité de premiers fixateurs. Sur la surface ainsi stabilisée, on introduit en culture l'Elymus giganteus, Sorghrastum nutans Panicum virgatum, etc.

En Amérique du Sud, les sables mouvants se rencontrent dans les déserts du Pérou et du Chili (Sechura, l'Atacama) et en Monte-Patagonie en Argentine. Leur superficie est peu significative et le problème de la lutte contre l'ensablement ne se pose qu'à l'échelle locale.

Les plus importants travaux de fixation des sables mouvants sont effectués en Argentine, dont environ 75 % du territoire, dans les parties nord et ouest, sont caractérisés par une aridité du climat croissant de l'est à l'ouest.

Toutes les zones arides et semi-arides ont plus ou moins exposées à l'érosion éolienne. Dans la partie ouest du Panama Argentin l'érosion éolienne se manifeste sous la forme la plus typique, qui est la formation de dunes de sable. En Argentine, la distinction est faite entre les dunes côtières et les dunes continentales — «medanos».

La hauteur des medanos varie de 50 cm à 15—20 m et leur superficie de moins d'un hectare jusqu'à 100 ha.

Les expériences de la fixation des medanos ont débuté en 1959. Parmi les méthodes de fixation citons les suivantes:

1. **Aplanissement**, qui se fait par trois procédés de base:

1) à l'aide de souffleries (disperseurs de sable),

2) à la niveleuse,

3) par transfert de sable du côté sous le vent au moyen de madriers par lesquels les crêtes des dunes sont aplanies et la pente abrupte sous le vent supprimée.

Les niveleuses et les madriers sont tirés par un tracteur à chenilles ou par des bêtes de trait puisque les tracteurs à roues ne peuvent passer sur les dunes de cette hauteur.

2. **Semis d'un mélange de cultures fourragères** au semoir:

1) en automne (mars-avril) on sème le mélange suivant: 60 kg de seigle, 5 kg d'Agropyrum elongatum et 5 kg de Vromus brevis par hectare, bien que pour la fixation des sables le seigle seul suffise;

2) au printemps (octobre-novembre) on sème le mélange suivant: 5 kg de maïs, 5 kg de *Panicum miliaceum*, 5 kg de *Sorghum caffrorum*, 5 kg de *S. sudanense* et 5 kg de *S. almus* par hectare; on y ajoute 1 kg d'*Eragrostis curvula*; si les graines de quelques plantes citées manquent on peut s'en passer facilement (les plus importants sont: *P. miliaceum*, *Sorghum* et *E. curvula*).

3. Au cours des semences, la dune est revêtue d'une mince couche de terreau (au printemps) ou de paille de sorgho (en automne).

4. Pour que le terreau ne soit pas emporté par le vent, on pratique un passage de pulvérisateur à disques. Grâce à cette méthode, une dune se transforme en pâturage stabilisé au bout de 3 à 6 mois.

Le revêtement de fixation en asphalte et bitume à la place de terreau herbeux a donné de bons résultats. Tout en étant acceptable, cette méthode n'est pas largement répandue puisque les équipements compliqués pour le revêtement en matériaux de fixation font défaut à la campagne. En plus, cette méthode est plus coûteuse que le terreautage.

La Corporation nationale de l'économie forestière a joué un grand rôle dans la lutte contre les sables mouvants au Chili, où plusieurs régions en ont souffert.

La fixation de dunes était effectuée par les méthodes mécanique et biologique. Cette dernière, plus efficace et moins coûteuse, est appliquée à une plus vaste échelle. Après la fixation, on plante les espèces ligneuses telles que *Pinus radiata*, *P. pinaster*, *Acacia cranophylla*, *A. lophanta*, *A. melanoxylon*, *Robinia pseudoacacia* et *Populus* [Milas, 1981].

Ce bref aperçu de l'expérience de la lutte contre les sables mouvants dans différents pays montre que ce travail exige beaucoup de main-d'œuvre et reste assez coûteux. Cependant, les méthodes connues mises au point, expérimentées et vérifiées en pratique permettent de rester optimiste face à la solution du problème dans l'avenir.

2.2. INDICATEURS DE LA FIXATION DES SABLES

La surveillance continue des sables mouvants par les moyens aérospatiaux comprend tout un ensemble de mesures terrestres, aériennes et spatiales portant sur la composition, l'étendue et la dynamique des sables fixés, ainsi que sur les conditions écologiques de leur phytoamélioration et la mise en valeur. Le relief des sables mouvants de diverses régions du globe terrestre a été étudié à l'aide des photographies aériennes et spatiales [Fedorovitch, 1948; Petrov, 1973; McKee, Breed, 1974; Mainguet, 1976]. Le dépouillement écologique de l'état des sables présente beaucoup plus de difficultés.

Examinons de plus près les résultats de recherches sur l'application des méthodes aériennes et spatiales pour l'étude des sables mouvants et de leur degré de stabilité. La base théorique de ces recherches est la

mesure des effets optiques et radiographiques des sables mouvants. En s'appuyant sur ces connaissances et les expériences d'identification, les indicateurs du degré de stabilité des sables sont décrits. A l'aide des indicateurs, les structures spatiales à différents niveaux hiérarchiques sont étudiées et les écosystèmes des déserts sableux sont cartographiés à des échelles différentes.

Propriétés optiques et radiographiques des sables mouvants. Les traits caractéristiques de l'image sur les photographies aériennes et spatiales des sables mouvants sont déterminées par les caractéristiques de réflexion et d'émission de ceux-ci et les possibilités d'identification sont fonction des contrastes optiques et radiographiques par rapport aux sables stabilisés.

En bande optique, les caractéristiques spectrales des réflexions des sables de différents degrés de stabilité sont les plus informatifs. Dans la partie visible du spectre 0,4–0,7 μm , les massifs de sable couverts de végétation à raison de moins de 5 % présentent, en saison sèche, des facteurs de brillance élevés (jusqu'à 0,3–0,5) en fonction de l'origine et de la composition minéralogique. Les sables éoliens caractérisés d'origine alluviale ont une pente douce de la courbe du facteur de brillance qui croît progressivement avec la longueur d'onde. La courbe a une forme logistique caractéristique et est décrite suivant 4 valeurs de référence du facteur de brillance: ρ_1 à la longueur d'onde de 0,44 μm en zone bleue, ρ_2 à la longueur d'onde de 0,54 μm en zone verte, ρ_3 à la longueur d'onde de 0,68 μm en zone rouge et ρ_4 à 0,8 μm en zone infrarouge proche. La courbe se distingue par un palier du facteur de brillance relativement bas dans la partie verte à bleue du spectre de 0,40 à 0,54 μm avec un ρ de 0,17 à 0,26, par un palier du facteur de brillance relativement élevé dans la partie rouge de 0,6 à 0,8 μm , avec un ρ de 0,4 à 0,5 et une élévation relativement brusque du facteur de brillance dans la partie jaune à orange du spectre de 0,54 à 0,60 μm avec un rapport spectral élevé $(\rho_1 - \rho_3)/(\rho_1 + \rho_3)$ de 0,44 à 0,50. Pourtant, le facteur de brillance spectrale des sables dépend fortement du taux de couverture végétale, de la composition minéralogique, du microrelief, de l'illumination, de l'humidité et d'autres conditions physiographiques de la prise de vues.

La végétation constitue le principal facteur de contrôle déterminant les propriétés optiques des écosystèmes des sables. Les sables embroussaillés intégralement couverts de végétation verte présentent le facteur de brillance le plus bas de 0,10 à 0,12. Les sables embroussaillés normalement couverts de végétation, à raison de plus de 60 %, présentent, pendant la période de végétation, également un facteur de brillance bas (0,12 à 0,15) dans la partie orange à rouge du spectre de 0,6 à 0,7 μm . Par conséquent, les sables mouvants présentent un contraste optique élevé au printemps, en période de végétation des éphémères, par rapport aux sables embroussaillés, lequel contraste atteint par endroit 0,6 à 0,7. En outre, pour les sables embroussaillés recouverts de végétation mésomorphe à plus de 60 %, on voit s'élever considérablement le facteur

de brillance dans la partie verte du spectre de 0,52 à 0,58 μm et dans la zone infrarouge proche de 0,8 μm . Les sables au degré de stabilité faible à moyen présentent, en période de végétation, des facteurs de brillance intermédiaires, près de 0,28 à 0,30 et de 0,20 à 0,22 respectivement. Le contraste optique des sables mouvants par rapport à ceux au degré de stabilité moyen diminue jusqu'à 0,35–0,50 et à ceux au degré de stabilité faible, jusqu'à 0,12–0,25. Le contraste optique entre les sables embroussaillés et mouvants dans la partie infrarouge proche du spectre tombe jusqu'à 0,3–0,4, et dans la partie verte, jusqu'à 0,1–0,2. A la suite de ce contraste optique, sur les photos panchromatiques avec un filtre orange, les sables mouvants se distinguent nettement par la nuance claire des massifs contrastant avec la toile de fond gris foncé des sables fixés. Comme le passage des uns aux autres s'effectue par les stades des sables à stabilité moyenne et faible, les frontières entre les sables mouvants et embroussaillés sont soit diffuses, soit en mosaïques, en particulier sur les photos à petite échelle.

Les paramètres optiques des sables éoliens d'origine alluviale sont caractérisés par les valeurs moyennes du facteur de brillance décrites ci-dessus. Le facteur de brillance des sables éoliens d'origine alluviale (marine et proluviale) est fortement variable en fonction de leur composition minéralogique. Dans la partie orange à rouge du spectre de 0,6 à 0,7 μm , le facteur de brillance des sables éoliens typiques jaune grisâtre du Bas Kara-Koum fait 0,32 à 0,36, celui des sables quarzeux et carbonatés augmente jusqu'à 0,42–0,50, celui des sables gypseux est de 0,65 à 0,70 et celui des sables micacés et verts tombe jusqu'à 0,18–0,25.

L'humidité est le deuxième facteur abiotique qui contrôle les propriétés optiques des massifs de sable. Un sol sableux se distingue par des gradients optiques élevés déjà pour de faibles valeurs de l'humidité, en particulier dans la partie orange à rouge du spectre de 0,6 à 0,7 μm . Dans l'intervalle de l'humidité entre le maximum d'hygroscopicité de 1–2 % et le minimum de capacité hygroscopique de terrain de 6–8 % se produit une rapide baisse du facteur de brillance jusqu'à 0,18–0,22, ce qui présente un contraste optique élevé entre le sol sec et humide (de 0,45 à 0,50). Cependant, dans les sables, du fait de la faible bande optique de passage des sols secs aux sols humides et de la haute mobilité de l'eau dans le sol, on ne distingue que trois degrés d'humidité: 0–1 %, 2–6 % et plus de 6 %.

La teneur en humus de sols sableux ne dépasse pas 1,0 à 1,5 %, sauf dans les dépressions à végétation épaisse et sur les lieux d'élevage de bétail, et constitue donc un facteur de contrôle faible. Par conséquent, les sols désertiques sableux typiques ont un faible facteur de brillance dans la partie orange à rouge du spectre de 0,6 à 0,7 μm (0,25 à 0,28). Le contraste optique des sables suivant la teneur d'humus est de 0,20 à 0,35.

Enfin, le facteur de brillance des sables est fonction du morcelle-

ment de leur surface. Aux autres conditions égales, une surface sableuse fendillée se distingue d'une surface lisse par un plus faible facteur de brillance. Les différences du facteur de brillance entre les sables fendillés et lisses augmentent avec la baisse de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon. Les indicatrices de la dispersion de la lumière par les sables à nanarelief accusé pour une hauteur du soleil inférieure à 45° et l'angle d'observation de plus de 45° (par rapport à l'horizontale) sont fort dissymétriques: elles sont nettement plus claires du côté de la source d'éclairage et plus sombres du côté opposé.

Les propriétés radiographiques des sables désagrégés déterminant les traits caractéristiques de leur image sur les photos infrarouges en première (3 à $5 \mu\text{m}$) et deuxième (8 à $14 \mu\text{m}$) fenêtres de transparence de l'atmosphère sont extrêmement complexes et non stationnaires [Vinogradov et al., 1972; Hovis et al., 1968]. Les températures de radiation des sables désagrégés mesurées à partir d'avions et de satellites varient considérablement suivant la saison, le temps et l'heure. En règle générale, en été et aux heures diurnes par temps clair et calme, les sables dénudés sont plus «chauds» que les sables fixés à une végétation plus ou moins épaisse; plus la végétation est épaisse, plus «froids» sont les sables fixés. Le contraste de radiation le plus marqué entre sables mouvants et sables couverts de végétation tombe sur midi et les heures immédiatement précédentes et atteint 30 à 40°C .

La répartition des températures de radiation dans les sables est également déterminée par le vent. Aux autres conditions égales, les secteurs les plus «chauds», c'est-à-dire les plus clairs sur les photographies infrarouges aériennes et les plus sombres sur les photographies infrarouges spatiales, ne sont pas les versants exposés au soleil, mais ceux du côté sous le vent à une vitesse du vent de plus de 5 à 7 m/s.

Les nuages diminuent considérablement les contrastes de radiation dans les massifs sableux; la pluie a pour effet leur redistribution en fonction de l'humidité du sol: les sables humides s'avèrent plus «froids» en saison chaude, les sables secs, plus «chauds».

Dans la partie chaude du spectre de 0,3 à 30 μm , les massifs sableux mouvants, à température physique égale, se distinguent des sables fixés par des températures de radiation plus basses.

Outre la surface des arènes sableuses, l'image aérienne et, en particulier, spatiale des massifs sableux se trouve influencée par la teneur de lithométéores dans l'atmosphère, par les tempêtes de poussière et de sable, les courants atmosphériques et le voile de poussière propres aux régions à sables mouvants. La poussière et le sable dans l'atmosphère agissent sur la brillance de la surface radiographiée comme un milieu trouble, c'est-à-dire augmentent la brillance des nuances sombres et diminuent celle des nuances claires. Comme les massifs de sable mouvants présentent une nuance gris clair, l'action d'un voile de poussière sur leur brillance est faible. Les faibles teneurs de lithométéores dans l'atmosphère ne modifient guère le facteur de brillance des sables désagrégés, par contre, elles se répercutent sur la définition d'image.

Les accumulations de poussière et de sable de concentrations moyennes augmentent le facteur de brillance des sables dans la partie visible du spectre de 0,05—0,09. Les détails de la surface terrestre sont encore visibles bien que leurs contrastes optiques soient fortement diminués. Les courants de poussière et de sable présentent une brillance superposée élevée (0,1 et davantage). L'atmosphère trouble masque entièrement les détails de la surface terrestre en ne laissant voir parfois, sur le fond gris clair des sables, que des ombres de nuages lithométéoriques.

Dans la zone infrarouge du spectre de 3 à 30 μm , les concentrations de poussière et de sable dans l'atmosphère au-dessus des massifs de sable mouvant font, au contraire, diminuer leurs températures de radiation. Par conséquent, une surface de sable cachée par des flots de poussière et de sable atmosphériques se présente sur les photographies spatiales plus «froide», c'est-à-dire plus claire que les sables sous une atmosphère transparente.

Déchiffrage du degré de stabilité des sables. Des massifs de sables mouvants sont détectés sur les photographies aériennes et spatiales prises non seulement dans le désert, mais aussi dans les zones des steppes et même des forêts [Rasmussen, 1962; Fryrear, Wiegand, 1974; Parchikov, 1968; Koulik et al., 1980]. Des sables mouvants d'origine anthropique secondaire sont observés sur des sols labourés légers dans différentes zones géographiques; ils sont déchiffrés sur les photos aériennes de grande et moyenne échelles (1:10000 — 1:30000), tandis que certains massifs sont également visibles sur les photos aériennes et spatiales de petite échelle (1:100000 — 1:300000). Dans les déserts, ces sables mouvants «post-agraires» sont fréquents à la périphérie des terres irriguées depuis longtemps et atteintes de minéralisation secondaire et sont identifiés suivant les indices décrits ci-dessus pour les sables désagrégés du Bas Kara-Koum. Les massifs de sables mouvants sont également fréquents sur les sols argilo-siliceux des champs labourés abandonnés de la zone des steppes. Ces massifs sont mobiles quoique de faibles dimensions. Vu l'absence dans la steppe de la flore psammophile, ces sables sont d'abord presque dénués de végétation, ensuite, à mesure que le matériau sableux s'épuise, ils se couvrent de mauvaises herbes xérophiles, puis de graminées à touffe lâche et de graminées à rhizome. Ils se présentent sous forme de taches claires contrastant avec le fond environnant du quadrillage des champs. Les sables mouvants sont observés sur des champs labourés pendant longtemps implantés sur des terrains sableux d'origine fluvioglaciaires et les «sand green» dans la zone des forêts, où, sur un fond du quadrillage des champs, des taches claires des sables éoliens allongées dans le sens des vents principaux sont nettement visibles.

Enfin, on trouve des sables mouvants d'origine anthropique secondaire dans des endroits déboisés; là, les massifs de sables mouvants forment un contraste frappant avec la couverture forestière. Dans certains cas, il s'agit de sables marins ou alluviaux récents dans lesquels les successions primaires de la formation de la couverture végétale ont été

troublées par la coupe. De tels massifs de sables mouvants sont fréquents sur le littoral de la mer Baltique et de l'océan Atlantique aux Etats-Unis. Les sables mouvants d'origine anthropique secondaire sont surtout impressionnants sur les parquets exploités des forêts développées sur les sables anciens d'origine glaciaire ou alluviale. Du fait de l'absence de psammophytes, les sables y sont pratiquement dénudés et apparaissent sous forme de taches claires sur un fond gris foncé des forêts, grâce à quoi ils sont visibles non seulement sur les photographies aériennes, mais aussi sur les photos spatiales. L'un des exemples les plus connus de sables mouvants parmi les forêts de la taïga est fourni par les sables de la région transbaikaliennne en RASS des Bouriates.

Les photographies spatiales de différente résolution spatiale, de 30—100 m à 3—5 km, et de différente visibilité, de 100 000 km² à 1 000 000 km², sont utilisées pour étudier les structures des gros massifs sableux [Vinogradov, Grigoriev, 1970, 1971; Kravtsova et al., 1976; McKee, Breed et al., 1979; Verstappen, Zuidam, 1970; Kolm, 1973; Mainguet et al., 1974]. A ces échelles, les formes éoliennes élémentaires du relief ne se présentent pas distinctement («foyers» de déflation, barkhanes, etc.), mais on voit nettement les macro- et mégaformes du relief éolien. Le dépouillement des photographies spatiales a fait porter un intérêt particulier sur les sables rassemblés en grandes chaînes parallèles à la direction des vents dominants. Ils ont été suivis par les photos spatiales sur des distances de quelques dizaines, voire centaines, de kilomètres. Ces formations reflètent la direction non seulement des vents contemporains, mais aussi des paléo-vents caractéristiques des époques climatiques révolues. Une deuxième classe d'importantes formes éoliennes du relief reconnue sur les photographies spatiales est représentée par toute sorte de sables réticulaires, de grosses barkhanes, de cuestas perpendiculaires aux vents dominants. Les photos spatiales ont permis de décrire des formes particulières du macro- et mégarelief éolien, telles que les dunes pyramidales.

Les unités biogéocénologiques élémentaires de différent degré de stabilité et, par conséquent, de différente densité optique de l'image, ne se distinguent pas séparément sur les photographies spatiales, mais s'intègrent en combinaisons multiples, la nuance de chacune de celles-ci étant déterminée par le rapport spatial entre les unités photo-isomorphes élémentaires. Ainsi, cinq degrés de stabilité des sables: embroussaillés + semi-fixés, de stabilité moyenne, de stabilité modérée, de stabilité faible et désagrégés avec les variations de la surface relative par paliers de 10 % présentent $1,5 \times 10^5$ de combinaisons possibles. Ce chiffre fait peur. Cependant, comme l'ont démontré les calculs des fréquences spatiales de diverses combinaisons du degré de stabilité des sables, dans chacun des types de sables, on ne rencontre, pour les valeurs de la fréquence sûres, c'est-à-dire égales et supérieures à 0,05, que 7 à 10 combinaisons. Les combinaisons présentent des valeurs intermédiaires de la densité de nuance de l'image photographique entre les sables entièrement embroussaillés et entièrement désagrégés. C'est

ainsi que, la densité de l'image des sables embroussaillés et semi-fixés étant de 0,6 à 0,8, celle des sables de stabilité modérée, de 0,9 à 1,0, celle des sables de stabilité moyenne, 1,1 à 1,2 celle des sables de stabilité faible, 1,3 à 1,5 et celle des sables désagrégés, 1,6 à 2,0, pour les surfaces relatives de 0,5:0,5:2:3:4 respectivement, la combinaison présente sur la photographie spatiale une densité moyenne de l'image de 1,325 à 1,575, et pour les surfaces relatives de 2:6:1:0,5:0,5, elle est plus basse, entre 0,915 et 1,035. Il en résulte que, sur les photos spatiales prises en saison de printemps avancé, les massifs sableux à prédominance des sables mouvants et faiblement fixés présentent une nuance gris clair, les massifs à prédominance des sables essentiellement embroussaillés et semi-fixés se reconnaissant par une nuance gris foncé. Le contraste optique entre les unités combinées baisse, par rapport à celui observé entre les unités élémentaires, de 1,0—1,2 jusqu'à 0,4—0,6 à cause de la réduction de l'échelle et de la généralisation spatiale.

L'étude de la structure et la cartographie des sables mouvants.

Les écosystèmes des sables mouvants peuvent être étudiés à l'aide des méthodes aériennes et spatiales à tous les niveaux spatiaux: au niveau subélémentaire avec détection de plantes isolées et des formes du nanarrelief, à l'échelle de 1:1000 et plus grande; au niveau élémentaire avec détection des associations végétales et des éléments des formes du relief, à une échelle d'environ 1:10000; et à des niveaux d'intégration multiples avec détection de combinaisons d'associations végétales, de combinaisons de surfaces sableuses de différente stabilité et des formes du macro- et mégarelief, à l'échelle de 1:30000 et moins.

L'étude détaillée des écosystèmes des sables mouvants se fait d'après les photographies au 1:1000 et plus prises depuis des avions volant à basse altitude, des ballons et des tours d'observation. Le dépouillement des photographies aériennes au 1:3000 — 1:5000 se fait par des appareils stéréoscopiques polyvalents de précision moyenne équipés de traceurs de courbes mécaniques permettant de dessiner les formes éoliennes particulières du nana- et microrelief, les horizontales de section de 0,5 à 1,0 m, les arbustes, arbrisseaux et grosses herbes isolés (projecteur stéréoscopique SPR-2, stéréographe SD-2, stéréotopographe de Zeiss, stéréomicromètre de Santoni). Sur un terrain d'essais de 500 m² dans le Bas Kara-Koum, les photographies aériennes au 1:2000 agrandies jusqu'à l'échelle de 1:250 — 1:500 ont permis de détecter dans les sables mouvants et faiblement fixés des arbustes aréniçoles d'*Ammodendron conollyi*, *Calligonum caput-medusae*, *C. setosum*, *Haloxylon persicum*, *Salsola richtai*, des arbrisseaux de *Mausolea eriocarpa*, *Astragalus unifolialatus*, de grosses herbes de *Stipagrostis pennata*. La nomenclature des espèces a été reconnue avec une précision dépassant 0,95. L'erreur de localisation des plantes était inférieure à 10—20 cm.

Le moyen le plus efficace d'étudier les écosystèmes de sables mouvants au niveau biogéocénotique élémentaire est la photographie aérienne au 1:10000 (1:6000 à 1:15000). A titre d'exemple, nous citerons le

dépouillement des unités écologiques de différente stabilité dans un ensemble attenant à un puits d'après une photographie aérienne au 1:10000. Au centre de l'ensemble se trouvent un takyr capteur de l'écoulement, un puits creusé et un «tyrlo» ou terrain battu où l'on tient le bétail et on monte les tentes. Le takyr s'identifie par une nuance gris clair, le tyrlo, par une couleur gris foncé régulière, et le puits avec la piste pour les chameaux actionnant la noria, longue de 2 à 4 m à l'échelle de la photo aérienne, par un point. Vient ensuite une étroite ceinture intermédiaire de sables fins faiblement fixés à buissons bas et à herbes d'*Artemisia*, *Kemrudila* + *Stipagrostis pennata* représentés par une nuance grise finement texturée. Le tout est entouré par une ceinture de sables désagrégés formant des barkhanes grosses à moyennes, ce qu'on appelle «aklang», avec des exemplaires unitaires d'herbes (*Stipagrostis pennata*), et d'arbustes (*Calligonum caput-medusae*) arénicoles représentés par un gris clair avec un dessin de barkhanes net et de rares points de psammophytes. Vient ensuite une ceinture de sables de stabilité faible à moyenne rassemblés en barkhanes et collines avec des associations d'arbustes, d'arbrisseux, d'herbes et d'éphémères arénicoles représentés par une nuance gris clair à grise avec un dessin effacé des barkhanes et des points plus foncés des plantes. Cet ensemble passe enfin en un fond des sables cellulaires de stabilité moyenne et semi-fixés avec des associations d'*Haloxylon Persicum* + *Carex Physodes* + *Herbal ephemerae* donnant sur la photo une nuance grise à gris foncé avec un réseau cellulaire du relief et des points foncés des plantes.

Aux niveaux intégrés, ces structures des sables mouvants et faiblement fixés attenants aux puits se fondent en un seul contour et sont déchiffrables sur les photos spatiales au 1:300000 — 1:1000000 de résolution de 30 à 100 m. Sur ces photographies, tout l'ensemble attenant au puits décrit ci-dessus comprenant des sables à différents degrés de stabilité de diamètre de 2 à 3 (de 1 à 6) km présente une tache gris clair de diamètre de 2 à 3 (1 à 6) μm à l'échelle de la photographie spatiale. De telles taches arrondies dispersées (nuance gris clair) avec un point clair du puits au centre et les frontières diffuses sur le fond gris foncé des sables fixés sont discernables sur des photos spatiales prises au printemps au Kara-Koum, au Kyzyl-Koum, au Kara-Bilé, dans le désert du Balkhach. Au sud-est du Kara-Koum, pour la profondeur de la nappe phréatique de 15 à 40 m, la densité moyenne des taches attenant aux puits est près de 3 par les 10 km² et la distance moyenne entre eux est de 9 km environ. Leur répartition est raréfiée, la densité est fonction de la capacité des pâturages. La superficie relative des taches correspondant aux sables mouvants et faiblement fixés dans le paysage sableux n'atteint pas 10 %, ce qui n'altère pas le fonctionnement du géosystème du massif sableux dans son ensemble.

La cartographie des sables mouvants et du degré de leur stabilité pose un problème compliqué du fait de la disparité extrême de la structure spatiale des déserts sableux. Les unités élémentaires de fixation des sables ne peuvent être tracées que sur les cartes de grande échelle, du

1:10000 et plus. Aux échelles plus petites, de 1:30000 et moins, il est impossible de montrer les contours simples de la fixation des sables et on est tenu de montrer les combinaisons de secteurs de différente stabilité en indiquant la surface relative de chacun des degrés.

La surveillance continue de la dynamique des sables mouvants.

La surveillance aérospatiale continue de la dynamique des sables mouvants comprend de nombreuses applications de la photographie aérienne et spatiale à l'étude du degré de stabilité des sables: mise en évidence des indicateurs de la désertification, surveillance des courants de poussière et de sable dans l'atmosphère, mesure des mouvements d'oscillation et de translation des barkhanes, contrôle de la superficie des sables mouvants, enregistrement des successions de réhabilitation dans les sables bénéficiant d'un régime de réserve naturelle, évaluation de l'efficacité de la phytoamélioration des sables mouvants et, enfin, prévision de l'évolution de la stabilité des sables sur le plan des effets géophysiques qu'ils produisent.

En cartographiant la dynamique des sables, on utilise surtout des indicateurs statiques de la désertification et des indicateurs du degré de stabilité des sables. Les indicateurs permettant d'identifier les sables de différent degré de stabilité ont été décrits plus haut. On admet généralement que les sables, initialement ou tout au moins depuis l'âge de bronze, étaient semi-fixés. Il n'en est pourtant pas toujours ainsi: de nombreux massifs de sables désagrégés étaient, initialement, faiblement fixés. Ainsi, les indicateurs de déchiffrement statiques n'assurent pas l'obtention, d'après des photos unitaires, de conclusions inconditionnelles sur la dynamique et, ce qui compte surtout, les indices quantitatifs de la vitesse et de la direction de l'évolution des sables [Vinogradov, 1964; Kolm, 1973; Clos-Arceuduc, 1969].

Le principal indicateur statique de l'évolution des sables mouvants, c'est la reconnaissance des éléments reliques du paysage donnant des indications sur l'état de l'écosystème dans un passé récent. L'indicateur de la désagrégation des sables c'est la dénudation de formes éoliennes sur les versants ou entre ces derniers, d'horizons de sols désertiques sableux gazonnés, de takyrs, de solontchaks, de traces de déviation de lits de cours d'eau et de lacs, de réseau d'aryks (canaux d'irrigation), d'exemplaires disparus ou en voie de disparition de gros arbustes et d'arbres, de restes de tougais désertifiés, etc. Comme indicateurs du boisement des sables mouvants, mentionnons les dunes et les barkhanes fixées ayant conservé leurs formes, mais couverts actuellement de végétation touffue, herbacée et arbustive. De telles barkhanes fixées sont déchiffrées sur les photos aériennes des terres noires de la dépression Précaspicienne; au Moyen Age, ces terres ont subi des pressions de pacage plus importantes à l'époque de l'épanouissement des Hordes de Nogai et d'Or. Avec le départ des Kalmyks pour leur patrie originelle aux XVII—XVIII siècles, les sables mouvants ont commencé à se couvrir rapidement de végétation. Des formes éoliennes fixées ont été également détectées sur les photographies aériennes de l'Etat de Neb-

raska (Etats-Unis), de la Nouvelle Galles du Sud (Australie), où les sables se couvrent de broussaille avec l'amélioration des conditions climatiques et hydrogéologiques.

Un indicateur original de la dynamique contemporaine des formes éoliennes du relief a été fourni par l'observation, sur les photos spatiales de grande visibilité, des tempêtes et des courants de poussière et de sable dans l'atmosphère. On remarque, premièrement, que les directions des courants de poussière et de sable correspondent à celles de l'extension des chaînes du relief. Ces courants de vent chargé de sable contournent les obstacles et correspondent à la circulation météorologique, ce qui se répercute sur le dessin des chaînes du relief. Les discordances entre ce dessin et les courants de poussière et de sable contemporains visibles sur la photo spatiale s'expliquent par l'effet des paléovents. Les photos spatiales ont permis de décrire de nombreuses zones de transfert de lithométéores dans l'atmosphère: la zone de l'alizé tropical harmattan au sud-ouest du Sahara, la zone subtropicale du sirocco au nord de l'Afrique, la zone des moussons du Haaboub au nord-est de l'Afrique, la zone subtropicale du khamsin au Proche Orient. Il a été remarqué par ailleurs que l'azimut du transfert de lithométéores dans l'hémisphère boréale est dévié de l'orientation moderne des chaînes éoliennes de 10 à 20° à gauche par l'accélération de Coriolis. Deuxièmement, les photos spatiales permettent de distinguer des taches claires nébuleuses indiquant le développement de zones de déflation, de tempêtes et de tourbillons de poussière et de sable, où les particules de poussière et de sable se détachent de la surface. Il a été remarqué que ces régions de turbidité élevée de l'atmosphère correspondent aux zones critiques de désertification, par exemple, au sud du Sahara (dans les régions Ouarran, Erg-in-Sâkan, Kévir) et en Asie Moyenne (cuvette de Turkménie occidentale).

Le moyen le plus correct de surveillance continue de la dynamique des sables mouvants est la comparaison des photographies aériennes et spatiales d'un même massif échelonnées dans le temps. La comparaison des photos échelonnées est utilisée dans deux sens: mesure des mouvements d'oscillation et de translation des formes du relief de barkhanes et de la surface occupée par les sables mouvants dans un massif sableux.

Des expériences de surveillance du mouvement des sables à l'aide de photos aériennes répétées ont été réalisées dans divers pays du monde. La comparaison des photographies aériennes successives à l'échelle de 1:5000 des sables mouvants maritimes dans le delta de la Vistule (en 1952, 1958, 1968, 1973) a permis de déterminer les vitesses moyennes et maximales de la progression des sables. Les calculs ont montré que 58 % des sables progressent à une vitesse inférieure à 2 m/an, 23 % de 2 à 5 m/an, 18 % plus de 5 m/an, les vitesses maximales atteignant 10 m par an. Les volumes du matériau sableux transporté, l'influence des versants et de la végétation sur la vitesse du transport et d'autres paramètres du transfert des sables mouvants ont été calculés.

La surveillance de l'évolution de la surface des sables mouvants par

comparaison des photos répétées à intervalles de temps assez importants (de 5 à 8 ans), présente le plus grand intérêt. Les techniques de l'étude de la dynamique par voie de comparaison de photos répétées se divisent en visuelles et instrumentales.

La comparaison visuelle commence par la réduction des photos répétées à une même échelle et à un même intervalle de densité optique et de contraste. Ensuite, on procède au déchiffrement consécutif des photos répétées suivant une même légende. De nombreux exemples ont prouvé l'accroissement de la surface des sables mouvants, essentiellement du fait de l'exploitation industrielle des déserts. On constate également une expansion de la végétation sur les sables bénéficiant d'un régime de protection. Dans le comté de Sussex (Grande-Bretagne), la comparaison des photos successives de 1950, 1962, 1967, 1971, a servi à la surveillance continue de la réduction de la surface des sables désagréés à la suite des actions de protection engagées.

En dépit de la haute efficacité de la comparaison visuelle des photos répétées, l'importance du volume de l'information aérospatiale, l'augmentation de la fréquence des prises de vue, l'extension de la gamme des photos multispectrales et des échelles exigent l'élaboration d'une technologie instrumentale de détection de la dynamique des sables. En outre, une telle technologie exclurait les erreurs de nature subjective en rendant plus comparables les résultats obtenus par différents auteurs. Parmi les procédés instrumentaux, on peut distinguer les procédés optico-mécaniques et optico-électroniques. Ces derniers, à leur tour, se divisent en procédés d'interprétation instrumentale des images avec comparaison postérieure des résultats et en méthodes de calcul instrumental des images avec interprétation postérieure des différences obtenues.

En comparant deux images en vue de détecter un changement, chacune des images partielles est d'abord convertie à l'aide d'un digitaliseur photo-électronique, en forme numérique dans laquelle l'objet étudié est classé selon le niveau de telle ou telle caractéristique optique (densité optique, amplitude, contraste par bandes de fréquence, histogramme de brillance, etc.). Ces données sont introduites en mémoire ou bien sont visualisées sur un écran alphanumérique ou chromatique. Puis, les résultats de la classification selon ces paramètres sont comparés successivement par lignes et par points. On obtient ainsi une image résultante dont les symboles sont destinés à classer tous les changements visibles des écosystèmes [Vinogradov, 1980].

La surveillance continue de la dynamique des sables mouvants inclut également le contrôle de l'efficacité des mesures de phytoamélioration. La photographie aérienne de grande échelle est utilisée aux différents stades de la phytoamélioration des sables mouvants. D'abord, il s'agit de l'exploration préliminaire et de l'évaluation de la capacité d'adaptation des sables à tel ou tel type de phytoamélioration. Puis vient le stade de réalisation et l'enregistrement des travaux de phytoamélioration entrepris. Enfin, le stade principal de la surveillance continue, celui

d'exploitation, détermine l'efficacité de la phytoamélioration et l'état des plantations et de la stabilisation des sables. Toutes les mesures de phytoamélioration sont parfaitement visibles sur les photographies aériennes de grande échelle. Au bout de 10 à 15 ans après les plantations, l'efficacité de la phytoamélioration est détectable par l'accroissement de la densité des points sombres des arbustes, l'atténuation du contraste du dessin du relief éolien, la disparition des points triangulaires brillants de *Stipagrostis* et leur remplacement par de denses points d'arbrisseaux et de jeunes plants d'arbustes, l'assombrissement du fond des sables jusqu'à la nuance grise du fait du développement des éphéméroïdes. L'absence de ces indices et de l'évolution de l'image sur les photographies aériennes attestent l'absence de contrôle convenable de l'état de la phytoamélioration.

2.3. TRAVAUX D'AMELIORATION SYLVICOLE DANS LES DESERTS SABLEUX ET LEUR ORGANISATION

La création de forêts de protection dans les pâturages peu productifs de l'Asie Moyenne se fait conformément aux recommandations méthodologiques élaborées par différents établissements de recherche scientifique. Les bandes boisées de protection des pâturages peuvent être larges ou étroites selon le cas. La méthode de protection des pâturages par larges bandes boisées est proposée par l'Institut National de l'élevage de l'Astrakan auprès du Ministère de l'agriculture de la R.S.S. d'Ouzbékistan [Chamsoutdinov, 1975]. Il est prévu de développer des plantations de saxaoul noir (*Haloxylon aphyllum*) par semis en bandes labourées larges de 25 m espacées de 150 à 200 m. La méthode est recommandée pour les terrains propices à la sylviculture, sur les plaines de piémont aux sols sablonneux désertiques peu gypseux développés à pluviométrie annuelle de plus de 180—200 mm.

Une autre technologie [Léontiev, 1962, 1973] de protection des pâturages est proposée selon laquelle des bandes larges de 25 m sont pratiquées non pas par labourage plein, mais en cinq bandes étroites de 1,5 m où saxaoul est semé en lignes espacées de 5 à 8 m. Les bandes de protection créées par cette méthode remplissent les mêmes fonctions que les bandes pleines de 25 m. Le système des bandes étroites y garantit la préservation de la végétation naturelle, dont la restauration dans une bande large pleine exigerait 6 à 7 ans. La méthode des bandes étroites est conseillée dans les conditions typiques des déserts sableux (80 à 120 mm de pluviométrie annuelle et eaux souterraines inaccessibles pour les plantes).

La méthode à coulisses constitue la méthode principale de création de bandes de protection des pâturages dans le Kara-Koum. Les coulisses forment un système de trois bandes étroites de 1 à 1,5 m espacées de 5 à 6 m. Sur les surfaces améliorées la distance entre les coulisses fait 30 à 50 m. La méthode est née de la transformation des recomman-

dations de l'Institut des déserts [Ovezliev et al., 1972] et de l'Institut de recherches sur l'économie forestière de l'Asie Moyenne compte tenu des méthodes traditionnelles d'amélioration des pâturages peu productifs en Turkménie.

Sur les sols de loess fertiles bénéficiant d'une pluviométrie moyenne annuelle de 170 à 250 mm, l'amélioration des pâturages avec boisement de protection parallèle doit se faire, selon les recommandations, avec préparation préalable du sol: labourage par coulisses de 10 à 15 m de largeur alternant avec des surfaces non-labourées de même ou double largeur [Nétchaeva et al., 1958]. Le semis se fait avec l'enfouissement des graines.

L'amélioration des pâturages sur les terrains à dures conditions sylvicoles (sols brun gris compacts ou takyrs et takyroïdes) s'effectue [Moukhammedov, 1979] sur un fond de rigoles d'accumulation de sable et d'eau pratiquées à l'aide d'excavateurs à godets ou de charrues spéciales. La culture des plantes fourragères prévoit le sablage préalable des rigoles ou la recharge en eau pour le compte de l'écoulement superficiel des précipitations et ensuite le semis de graines des plantes choisies.

Dans les déserts sableux de l'Asie Moyenne, les bandes boisées de protection des pâturages font augmenter le rendement des cultures fourragères sur les terrains entre les bandes de 14 à 16 % et la capacité des pâturages de 30 à 40 %. Les bandes de protection favorisent surtout le développement des salsolacées et des éphémères qui, sous cette protection, se conservent à l'état desséché, sont moins fragiles et moins susceptibles de s'effeuiller. En 1979, les plantations sur bandes défrichées occupaient une superficie de 298.100 ha dans la R.S.S. de Turkménie et de 357.300 ha dans la R.S.S. d'Ouzbékistan, ce qui a permis d'améliorer 1,4 million d'hectares en Turkménie et 1,6 million d'hectares en Ouzbékistan.

Outre l'effet d'amélioration, le système de bandes boisées est important pour la protection des moutons contre les intempéries en hiver et en été. Les terrains boisés artificiels sont aptes à atténuer toutes les conditions météorologiques critiques provoquant la perturbation des fonctions physiologiques normales jusqu'aux conditions optimales [Vinogradov, 1967]. Cela assure un accroissement du rendement de l'élevage en viande de 10 à 18 %, en progéniture (agneaux) de 8 à 15 % et en laine de 7 à 12 %.

L'amélioration des sables mouvants prévoit la réalisation d'un ensemble de mesures comprenant la stabilisation de la surface sableuse et le développement d'une flore fixatrice de sable sur les terrains stabilisés.

L'aménagement de différentes protections mécaniques en matériaux d'origine végétale est traditionnel pour la pratique de la fixation des sables en Asie Moyenne. On y utilise largement des protections mécaniques verticales linéaires et réticulaires hautes de 0,3 à 0,7 m, des protections verticales linéaires semi-dissimulées hautes de 20 cm et des protections mécaniques recouvrantes en bandes de 60 à 70 cm et longitudinales (larges de 25 à 35 cm).

Les propriétés fixatrices varient selon le type des protections mécaniques adoptées. Les protections verticales linéaires et réticulaires assurent une stabilisation générale des sables mouvants en captant tout le matériau sableux venant de l'extérieur. Les protections recouvrantes en rangées et longitudinales ne font que stabiliser la surface sableuse. Tous les types de protections mécaniques créent des conditions favorables pour le rétablissement du manteau végétal de protection.

Les plantes fixatrices de sables sont cultivées sur les terrains stabilisés par semis de graines, par repiquage de plants ou par plantation de boutures.

Les procédés traditionnels de fixation et de boisement des sables mouvants sont appliqués de manière différenciée selon les conditions d'habitat, l'intensité du régime éolien et de la nature de l'ouvrage à protéger. Pour atteindre les objectifs généraux de l'amélioration (rétablissement de la végétation arbustive sur les sables des barkhanes) et stabiliser le relief sur des terrains à conditions d'habitat favorables, on recourt aux protections mécaniques recouvrantes par bandes ou longitudinales et à la culture par semis de graines. Dans les régions à dures conditions d'habitat (sables salinisés, nappe phréatique profonde, vents violents), on utilise les protections mécaniques verticales réticulaires et les cultures s'y font par repiquage de plants.

Les formes traditionnelles de l'amélioration des sables mouvants sont basées sur l'utilisation du travail manuel et leur rendement est assez bas. L'aménagement de protections mécaniques réticulaires sur une superficie de un hectare demande près de 40 personnes-jours.

Il est devenu possible de mécaniser les travaux de fixation des sables et les opérations sylvicoles dans les sables mouvants grâce à des produits chimiques assurant la formation à la surface du sable de revêtements antidéflation stables. Plus de cent matières liantes ont été essayées à cet effet. Différents procédés technologiques de revêtement de la surface sableuse [Gabai et al., 1971] prévoyant une mécanisation intégrale des opérations exigeant beaucoup de main-d'œuvre et la possibilité de réaliser la fixation des sables parallèlement aux travaux sylvicoles ont été mis au point [Svintsov, 1981].

La nouvelle méthode d'amélioration des sables des barkhanes assure une hausse du rendement du travail de 15 à 20 fois pour les travaux de fixation et de 5 fois pour les opérations sylvicoles.

La fig. 2 montre la structure organisationnelle des travaux d'amélioration des terres qui a permis de mettre à profit les réalisations de la science et de l'expérience avancée dans les conditions de la Turkménie.

Un grand rôle dans la structure des travaux d'amélioration des terres revient aux mesures préventives et organisationnelles et à la protection de la forêt (planification des travaux sylvicoles et des mesures de prévention des incendies, lutte contre les parasites, diffusion dans les entreprises de la documentation réglementant l'organisation des travaux sylvicoles compte tenu de l'ordre de leur réalisation, renforcement de la protection des forêts, etc.). La réalisation de ces mesures permet de pré-

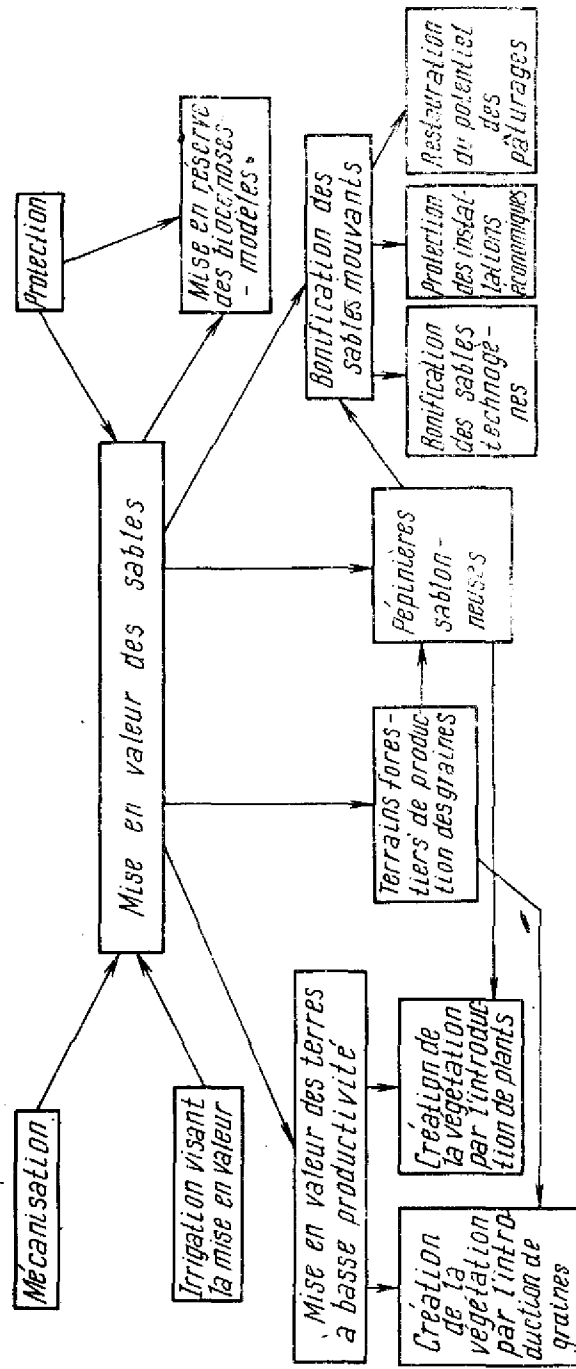


Fig. 2. Structure des travaux d'amélioration des terres

server la végétation sur les sables au cours des travaux de terrassement et, surtout, de la construction de pipe-lines, du transport d'équipements et du pacage. Les mesures préventives et la protection stabilisent les processus naturels et permettent même parfois de rétablir la végétation herbacée et arbustive.

La planification et la réalisation de l'amélioration des sables à un niveau de mécanisation élevé, prévoient une grande attention étant prêté à l'utilisation d'ensembles de machines, ainsi qu'à la nouvelle technologie des travaux sylvicoles.

Les procédés d'irrigation améliorative pour le compte des sources locales (eaux de surface, nappe phréatique, puits artésiens) ouvrent de nouvelles perspectives dans la réalisation des objectifs fixés.

La protection des biocénoses naturelles de référence plus ou moins sujettes à la dégradation prévoit l'organisation de réserves naturelles. Les régularités de l'évolution des biocénoses qui y sont mises en évidence sont mises à profit pour la prévision des processus naturels dans le désert de sable en relation avec la réalisation de différents projets.

Le désert de sable en tant qu'objet d'amélioration n'est pas considéré comme une entité unie, mais comme une somme de nombreuses composantes naturelles à caractéristiques qualitativement différentes. Pour faciliter l'analyse, on met à part les sables des barkhanes et les terrains sableux peu productifs. L'indice de productivité du terrain, qui dépend de la nature des roches sous-jacentes, des sédiments sableux d'origine éolienne, du niveau de développement et de la nature de la végétation sur les couches superficielles des sables, de la profondeur de la nappe phréatique, de l'humidité des assises de sable superficielles, de la profondeur et de l'épaisseur de l'horizon d'assèchement, des formes du relief et du niveau de son morcellement, de l'intensité des processus de déflation et de désagrégation des sables et du développement de la végétation, de l'origine des sables éoliens et du niveau de l'exploitation économique du massif sableux [Petrov, 1973], sert d'indice pour la division de l'objet destiné à rechercher les procédés appropriés de son amélioration.

L'approche scientifique de l'évaluation de la productivité du terrain qui se fait au stade d'avant-projet et de projet technique des travaux d'amélioration des terres permet de respecter le principe, scientifiquement fondé et planifié, d'allocation des terres pour les travaux d'amélioration et de choisir les plantes phytoaméliorantes en fonction des conditions d'habitat.

Les méthodes d'amélioration des sables de barkhanes dépendent de l'objectif fixé et se répartissent en mesures visant à l'amélioration des sables techniques, à la protection des ouvrages d'intérêt économique contre l'ensablement, à la restauration du potentiel des pâturages. Indépendamment de l'objectif assigné, on prévoit la mécanisation des opérations demandant beaucoup de main-d'œuvre à savoir: fixation de la surface sableuse par des matières liantes et possibilité d'organiser les travaux de fixation des sables en parallèle avec les travaux sylvicoles.

Dans les pâturages sableux sujets à la désertification, les mesures d'amélioration telles que semis ou plantation d'arbres, dépendent des conditions sylvicoles. On recourt au semis sur les terrains aux conditions d'habitat favorables et à la plantation sur les terrains aux conditions d'habitat sévères. L'introduction en culture de nouvelles espèces plus productives permet d'élever le rendement du territoire.

Des exploitations spécialisées disposant de futaies porte-graine et de pépinières pour la culture de plants fournissent des semences de haute qualité pour satisfaire les besoins de la production.

L'organisation de futaies porte-graine sur des surfaces nouvellement boisées par la plantation de brins aux caractères génétiques déterminés est l'une des orientations prometteuses de la production des semences. Ce procédé a le défaut de ne fournir les premières graines qu'au bout de quelques années après le début des travaux.

Le choix des terrains, l'évaluation de la qualité des plantations choisies pour servir de futaies porte-graine et des plants sont des questions de principe à résoudre en organisant la production de semences.

Les sols des terrains destinés à recevoir les futaies porte-graine peuvent varier dans une très large gamme depuis les sols désertiques sableux jusqu'aux solontchaks humides recouverts de dépôts éoliens. La condition sine qua non dans tous les cas est la proximité de la nappe phréatique.

Les terrains alloués pour les futaies porte-graine doivent avoir un relief peu accidenté permettant le passage du tracteur en toute saison et de l'automobile en automne, en hiver et au printemps.

Quant à la superficie, il est nécessaire de choisir de vastes terrains — mille hectares et davantage — avec perspective éventuelle d'en faire des centrales de semences pour une zone pédoclimatique déterminée.

L'aménagement de futaies porte-graine sur la base des peuplements existants composés de sujets d'âges différents n'est recommandé que si ces peuplements ne comportent pas moins de 50 % d'arbres ou d'arbrisseaux possédant des propriétés génétiques de valeur, un rendement en semence élevé, une forte résistance aux maladies et aux parasites. Les indices qualitatifs des arbres sont déterminés très précisément au cours de la sélection qualitative. Le critère de détermination de la productivité en semence possible est l'indice de fructification en fonction des conditions édaphiques.

Il est utile de procéder à l'évaluation du peuplement deux fois par an, au printemps et en automne. Par exemple, pendant l'examen de printemps pour le saxaoul noir (*Haloxylon aphyllum*), on évalue la nomenclature des espèces (les formes écologiques) des peuplements selon l'indice le plus stable et le plus révélateur qui est la couleur des glumelles et des anthères et la productivité générale attendue de graines, selon l'intensité de la floraison. Au cours de l'examen d'automne, coïncidant avec la période de maturation des fruits, on précise le rendement général et le niveau de contamination des arbres par les maladies et les parasites. Les résultats des examens permettent de tirer des conclusions

sur la productivité en graines de tout le peuplement et sur l'utilité de l'organisation d'une futaie porte-graine.

Graçe aux particularités biologiques de l'*Haloxylon aphyllum*, il est possible d'organiser des futaies porte-graine sur la base de peuplements dont l'âge ne dépasse pas 10 ou 12 ans et la consistance 0,5 [Kokcharova et al., 1977]. Les peuplements doivent être de première ou, comme exception, de deuxième classe de qualité et peu atteints par le mildiou, gallices et autres maladies et parasites. Les arbres dont la forme écologique est la plus productive dans les conditions édaphiques données doivent prédominer.

Il est certainement plus compliqué de créer des futaies porte-graine sur les nouveaux terrains de boisement avec utilisation de plants sélectionnés. Pour ce faire, il est nécessaire d'effectuer des recherches préalables afin de découvrir les arbres positifs (+)*, de produire des plants sélectionnés et de les mettre en culture. La sélection des arbres positifs de l'*Haloxylon aphyllum* se fait compte tenu de la liaison entre la fertilité des formes écologiques et les conditions édaphiques. On sélectionne les arbres positifs parmi ceux dont la fertilité, à une haute qualité des graines, est un indice stable. Il est désirable que ces arbres soient déserrés et que par leurs indices d'évaluation ils se qualifient de première classe.

Les arbres sélectionnés sont numérotés, mesurés et décrits conformément à un formulaire standard et sont transmis aux soins de l'établissement sylvicole concerné. La documentation est également expédiée au centre de contrôle des semences de la république.

Les arbres sont considérés comme positifs à condition que leur progéniture hérite les qualités essentielles de ses prédécesseurs, à savoir la forme écologique, constitution du branchage et la productivité.

Les plants cultivés à partir de graines d'élite doivent correspondre aux normes. Les normes veulent que les plants ayant hérité les qualités des parents soient adaptés à la plantation mécanisée et aient une haute capacité de survie sur les surfaces à améliorer.

Les pépinières sableuses irriguées faisant partie du système général de l'amélioration des terres sont destinées à la culture de plants de végétaux fixateurs des sables. Ces pépinières ne comprennent qu'un secteur de semis, à la différence des pépinières sylvicoles traditionnelles. En une végétation, les plants atteignent les dimensions standard et sont prêts à être repiqués. Les plants cultivés dans les conditions d'arrosage artificiel font preuve d'une grande viabilité, d'une haute résistance et assurent une bonne prise dans les sables.

Pour le semis, on n'utilise que des graines de première et de deuxième classes produites par des arbres (ou arbrisseaux) positifs, ou par des peuplements de haute productivité se trouvant sur des territoires où

* Les arbres positifs (+) sont ceux qui dépassent considérablement par l'ensemble de qualités leurs homologues du même âge poussant dans les conditions identiques.

les conditions pédologiques et climatiques sont identiques à celles des terrains désignés pour les travaux d'amélioration.

La superficie d'une pépinière dépend du volume de production planifié et de la productivité attendue par hectare de semis. Pour les pépinières irriguées, cette dernière fait généralement 200 à 220 mille plants par hectare.

On choisit pour les pépinières des terrains sableux au sol peu ou point salin. L'épaisseur de l'horizon sableux ne doit pas être inférieure à 50 cm et les eaux souterraines doivent se trouver à moins de 1,5—2 m de la surface. On peut également utiliser des terrains au sol argilo-siliceux ou le loess non-salin et à nappe phréatique de 3 à 4 m de profondeur. Les terrains doivent être libres de plantes adventices, surtout, de celles à rhizomes.

Sur les terrains choisis, on réalise les travaux suivants: a) planage général; b) découpage du réseau d'irrigation; c) préparation du sol avant les semences (labour à une profondeur de 25 à 28 cm); d) épandage d'engrais organiques et chimiques; e) traitement aux pesticides si besoin est; f) division du terrain à ensemercer en planches; g) arrosage de compactage et de rétention d'eau.

La technologie des semences varie en fonction du type du sol et de l'espèce des graines semées.

Les normes de semis et la profondeur d'enfouissement des graines pour différentes espèces d'arbustes arénicoles sont données au tableau 6.

La meilleure saison pour les semences de graines dans les pépinières irriguées coïncide avec la montée stable de la température de l'air au-dessus de 5,0 °C, ce qui correspond, au sud de la Turkménie, à la deuxième moitié de février ou à la première décennie de mars, et, au nord, à la première moitié d'avril.

Tableau 6

Norme de semis et profondeur d'enfouissement
des graines dans une pépinière irriguée

Espèce	Norme de semis, kg/ha	Profondeur d'enfouissement, cm	
		sols sableux	sols argilo-siliceux et loess
<i>Haloxyton aphyllum</i>	100	2 à 3	1,5 à 2
<i>Haloxyton persicum</i>	80	2 à 3	1,5 à 2
<i>Salsola Paletziana</i>	60	2 à 3	2
<i>Calligonum arborescens</i>	200	5 à 7	5
<i>Calligonum elatum</i> , <i>Calligonum</i> de Turkménie	75	4 à 5	3 à 5

Pour assurer la prise simultanée des semis, il est nécessaire de procéder à une préparation des graines. A cette fin, les graines de *Calligonum* sont stratifiées pendant 30 à 50 jours et trempées pendant 4 à 5 jours dans l'eau courante.

Un autre procédé est adopté pour les graines d'*Haloxylon* et de *Salsola*: on procède au sablage durant 3 à 4 jours, ou au trappage dans l'eau courante pendant une journée.

L'entretien du semis comprend: arrosage, épandage d'engrais chimiques (dans le cas où ils n'ont pas été introduits au cours de la préparation du sol), désherbage, extermination des insectes nuisibles et des parasites du sol et protection contre les dégâts causés par le bétail.

L'arrosage et l'épandage d'engrais chimiques sont considérés comme les procédés agrotechniques fondamentaux, qui assurent la production de plants standard. Au début il est nécessaire de procéder à un arrosage d'humidification assurant le gonflement et la germination normale des graines. Il est effectué par rigoles immédiatement après les semences.

La lutte contre les plantes adventices dans les interlignes est mécanisée, et se fait par binage au buttoir. Sur les lignes de semis, les plantes adventices sont arrachées à la main. Le nombre de traitements dépend du développement de plantes adventices dans la pépinière.

L'extermination des insectes nuisibles doit se faire par étapes. Le sol contaminé de larves d'insectes nuisibles est traité aux insecticides au stade de la préparation. Le mildiou est éliminé par pulvérisation de soufre broyé à raison de 30 kg par hectare.

Les plants sont prélevés de la pépinière irriguée immédiatement avant le début des travaux de boisement. Les racines sont coupées à la profondeur de 35 à 40 cm. La hauteur de la partie aérienne du plant sert d'indice de qualité (tableau 7).

Indices de qualité des plants d'espèces
poussant sur sol sableux

Tableau 7

Plantes	Hauteur de la partie aérienne, cm		
	1 ^{re} classe	2 ^e classe	3 ^e classe
<i>Calligonum arborescens</i>	80	60	40
<i>Salsola Paletziana</i>	60	50	35
<i>Haloxylon aphyllum</i>	75	50 à 75	40 à 50
<i>Haloxylon persicum</i>	51 à 60	41 à 50	30 à 40

2.4. PROTECTIONS MECANIQUES

Dispositifs de rétention des sables. Pour protéger les ouvrages contre l'ensablement et pour prévenir la déflation, on applique en U.R.S.S., comme à l'étranger, différents types de dispositifs de rétention des

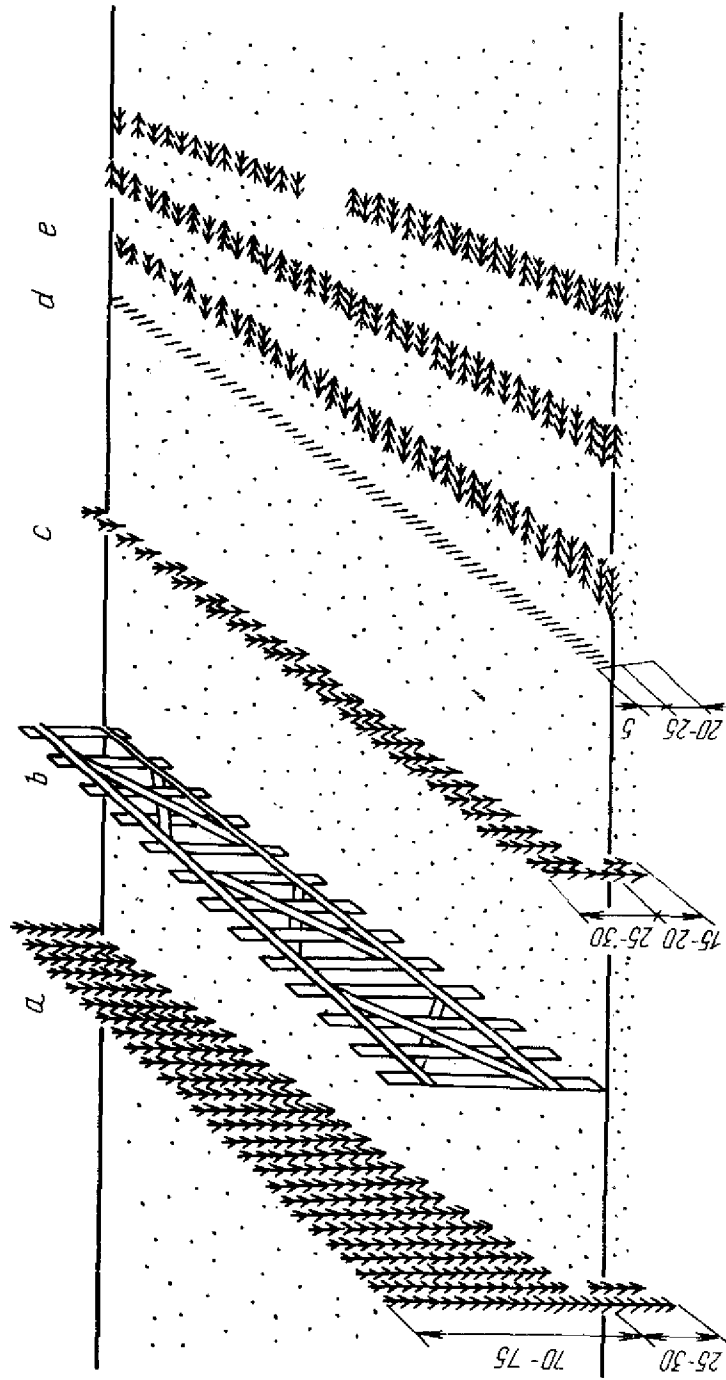


Fig. 3. Types de protections contre l'ensablement et la déflation du sable:

a — haute imperméable; b — haute perméable; c — semi-dissimulée; d — dissimulée; e — recouvrante linéaire

sables. Ce sont les protections mécaniques qui sont les plus utilisées. Leur variété se réduit aux deux principaux types suivants (fig. 3):

Protections imperméables: verticales à une ou plusieurs rangées; semi-dissimulées et dissimulées à une ou plusieurs rangées; réticulaires; recouvrantes linéaires et pleines.

Protections perméables: hautes en herbe à une rangée; hautes en bois à une rangée; hautes en lattes en bois ou en panneaux préfabriqués de béton armé.

Les protections hautes linéaires à une ou plusieurs rangées perméables et imperméables (fig. 3 a, b) ont une hauteur de 75 à 100 cm et une épaisseur de 10 cm. Elles sont installées perpendiculairement au transport résultant du sable et utilisées dans les régions caractérisées par un mouvement de progression et d'oscillation des sables afin de les arrêter. Les protections sont généralement faites d'herbes à tige droite. La demande en matériau est de 1,5 m³ pour 10 m de protection.

Les protections perméables en lattes servent pour former des bourrelets de protection des ouvrages contre les ensablements dans les régions aux sables progressant. Dans le même but, on installe plusieurs rangées de protections. Quand la protection est ensevelie sous le sable, on installe une nouvelle rangée sur le bourrelet formé ou bien on fait monter la vieille. Aussi, au bout de quelques années, la hauteur du bourrelet peut atteindre 15 à 20 m, voire davantage. La vitesse d'accumulation du sable dans le bourrelet dépend du volume du sable transporté.

Les protections imperméables semi-dissimulées et dissimulées à une ou à plusieurs rangées (fig. 3 c, d) ont une hauteur de 25 à 30 cm et une épaisseur de 4 à 5 cm. Elles sont installées perpendiculairement au transport résultant du sable. Les protections semi-dissimulées sont destinées à capter partiellement le sable transporté et à empêcher la déflation. Les protections dissimulées ne captent pas le sable transporté par le vent et sont surtout destinées à empêcher la déflation et à protéger les graines des herbes de l'action du vent. Elles sont largement utilisées en Asie Moyenne pour arrêter la progression de massifs de sable, ainsi que pour consolider les bordures de routes et les rives de canaux. Elles sont faites de branches de divers arbrisseaux et d'herbes et demandent 0,20 m³ de matériaux par 10 m de protection.

La capacité des protections de retenir le sable est caractérisée par la section transversale du bourrelet de sable qui se forme (S, m^2) et qui, pour les protections disposées sur une surface horizontale, est calculée selon la formule:

$$S = 0,5 (m + n) h^2 p \quad (1)$$

où (m) et (n) sont les indices de la pente des versants du bourrelet de sable du côté du transport résultant et du côté opposé; et (h_p) est la hauteur de la protection.

Les protections semi-dissimulées linéaires sont utilisées aussi pour égaliser le relief dunaire. A cette fin, on installe dans le tiers inférieur du versant au vent des barkhanes ou des chaînes de barkhanes plusieurs rangées de protections linéaires semi-dissimulées ou dissimulées. La partie inférieure des barkhanes ainsi fixée reste alors immobile, le sable venant avec le vent est déposé par la protection, et la partie supérieure de la barkhane est entraînée par le vent, ce qui fait que la hauteur de la barkhane diminue au profit de la longueur. Après l'installation d'un deuxième système de protection, l'arrivée du sable sur la barkhane diminue encore, et celle-ci s'aplanit pour devenir finalement une colline plate qui est ensuite fixée par des protections linéaires et la végétation.

Les protections semi-dissimulées réticulaires de 4 à 16 m² sont aménagées là où les sables sont animés d'un mouvement oscillatoire. Les protections semi-dissimulées couvrent toute la surface du terrain à protéger. D'habitude, les protections réticulaires sont utilisées sur les terrains destinés aux plantations et au renouvellement des peuplements existants. Les protections réticulaires préservent les jeunes plantes de l'ensablement et du burinage par les grains de sable. La demande en matériaux pour la confection de protections semi-dissimulées réticulaires est d'environ 160 m³ à l'hectare.

Les protections recouvrantes imperméables linéaires (fig. 3, e) sont des rangées parallèles d'herbes rameuses entassées en bourrelet haut de 60 cm et épais de 5 à 10 cm. Ce type de protection est destiné à retenir le sable apporté. Elles sont faites d'herbes et d'arbrisseaux rameux, vivaces ou annuels, débités à raison de 300 m³/ha.

Les protections recouvrantes pleines couvrent toute la surface du sable par une couche de 5 à 10 cm d'épaisseur constituée d'herbes ou de roseaux. Ce type de protections est mis en place simultanément avec les semences d'herbes sur des sables fort mobiles. La demande en matériaux pour l'aménagement de protections pleines est de 500 m³/ha. Les protections recouvrantes sont assez onéreuses et, de ce fait, sont rarement utilisées pour la protection des semis et des plantations sur de grandes surfaces. Elles sont efficaces pour retenir des barkhanes ou des buttes de sable isolées et pour fixer des talus sableux. Elles sont le plus souvent utilisées dans les pépinières sableuses pour protéger les jeunes pousses fragiles de la déflation ou du burinage par les grains de sable apporté de l'extérieur. Les protections recouvrantes exigent beaucoup d'entretien.

Les protections imperméables transportables sont utilisées pour modifier le relief des sables. Dans ce cas, on utilise l'énergie du vent pour espacer les chaînes de barkhanes et repousser le sable de l'ouvrage à protéger.

L'inconvénient principal de tous les types de protection mécanique est qu'ils demandent beaucoup de main-d'œuvre, puisque les travaux de leur installation ne sont presque pas mécanisés. Ces derniers temps, il a été avancé plusieurs suggestions concernant la mécanisation de la confection des protections, en particulier, les protections perméables en béton armé préfabriquées, mais à pose manuelle.

Les protections en sable trouvent également des applications pratiques. Elles sont aménagées par des mécanismes et ont la forme de fossés, de bourrelets, etc., qui servent à retenir le sable apporté. Pour éviter la déflation des bourrelets et des talus de fossés, ceux-ci sont consolidés par des amendements.

Les observations de terrain ont montré que le système fossé-bourrelet retient le mieux le sable. Les caractéristiques aérodynamiques des protections ne sont pas stables et évoluent avec la rétention du sable. Le caractère du dépôt de sable et la longueur des pentes au vent et sous le vent des accumulations de sable qui se forment en fonction de la hauteur du bourrelet au-dessus de la surface du sable sont montrés à la fig. 4.

Le volume du sable (en m^3) retenu par 1 mètre de protection, peut être calculé selon les formules:

pour le bourrelet de sable:

$$W_b = 2,5 h_b^2 + A_e h_o - 3 h_o h_b - 3 h_o^2 \quad (2)$$

pour le fossé:

$$W_f = A_m h_t (1 - \beta) + (L_o + A_t + 2A_o) \sqrt{0,5 A_m h_t \beta / a} \quad (3)$$

pour le système fossé-bourrelet:

$$W_{fb} = 5 h_b^2 = 5 h_t^2 \quad (4)$$

pour le système bourrelet-fossé:

$$W_{bf} = 4,5 h_b^2 = 4,5 h_t^2 \quad (5)$$

où A_e : la largeur effective;

A_m : la largeur moyenne du fossé;

h_t : la profondeur du fossé;

β : le coefficient faisant intervenir l'ameublissement du sol et les pertes de volume de sable à jour dans le fossé et dispersé sur les versants et le fond;

L_o : la distance entre les bords des cavaliers des fossés voisins;

A_t : la largeur des fossés avec les cavaliers;

a : le coefficient d'inclinaison des talus des bourrelets;

h_o : la couche de sable découpée;

A_o : la largeur du cavalier;

h_b : la hauteur du bourrelet au-dessus de la surface du sable.

Selon les observations, les systèmes fossé-bourrelet sont les plus efficaces quand ils forment avec la direction du transport résultant un angle de plus de 75° . Si l'angle est inférieur à $22,5^\circ$, le sable n'est presque pas retenu.

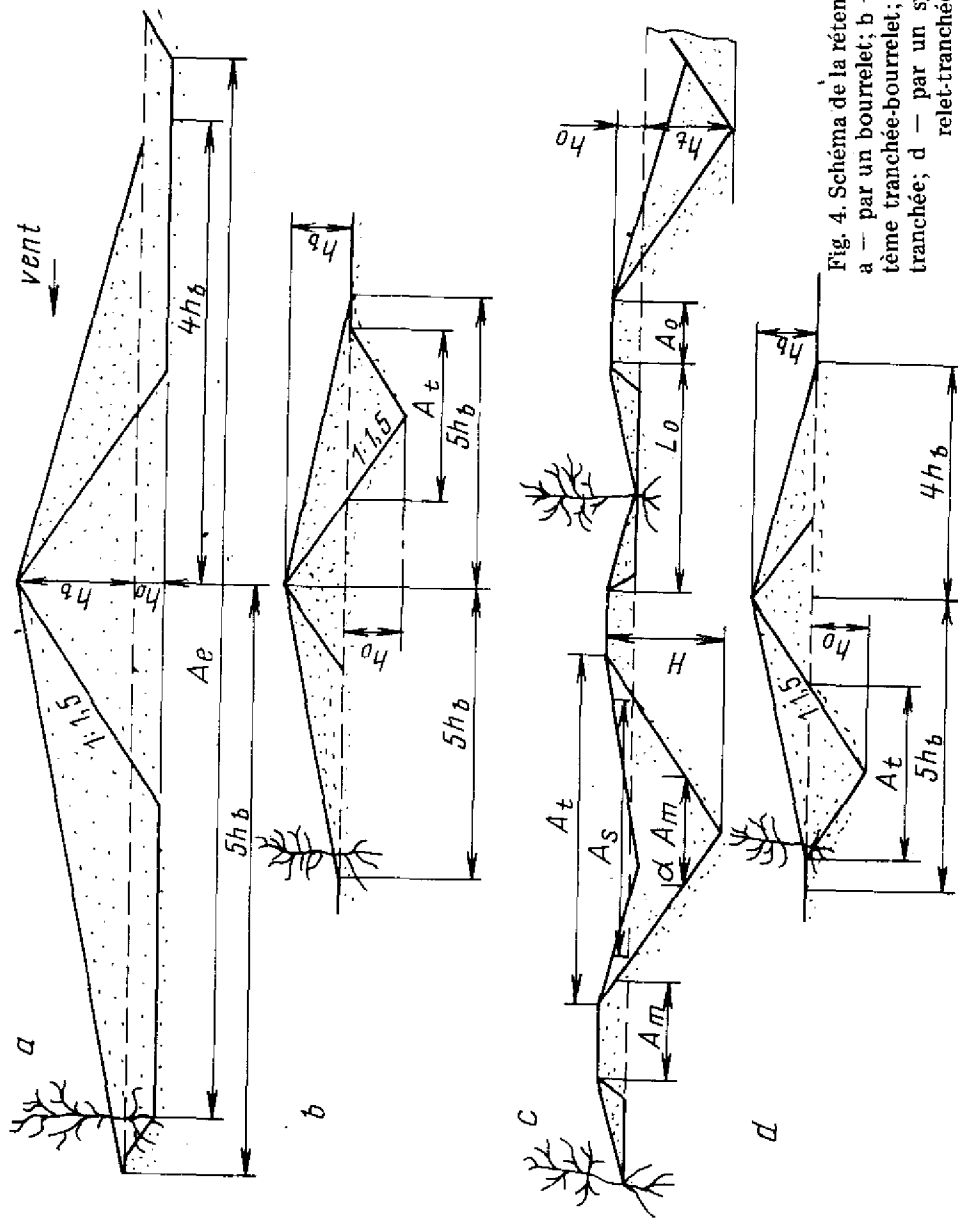


Fig. 4. Schéma de la rétention de sable:
 a — par un bourrelet; b — par un système tranchée-bourrelet; c — par une tranchée; d — par un système bourrelet-tranchée

Les dimensions des protections sont déterminées par les caractéristiques techniques des machines. La distance entre les protections doit être d'au moins 3 m pour permettre un traitement mécanisé du sol dans les interlignes.

Le nombre des rangées de protection (N) dans un système prévu pour retenir le transport annuel de sable est déterminé par la formule:

$$N = \frac{G_p}{W} \quad (6)$$

où (G_p) est le transport annuel de sable de probabilité admise (en m^3/m).

La largeur totale (L) d'une protection destinée à retenir le transport annuel de sable de probabilité admise est déterminée par la formule:

$$L = (n - 1) l \quad (7)$$

où (l) est la distance entre les rangées de protection et peut être calculée comme:

$$l = h_p (m + n) \quad (8)$$

Par exemple:

$$G_p = 10 \text{ m}^3/\text{m}, W = 1,5 \text{ m}^3/\text{m}, m = 5 \quad n = 4, h_p = 0,4 \text{ m}$$

N, l, L sont à déterminer

$$N = \frac{G_p}{W} = \frac{10}{1,5} = 6,66;$$

$$l = h_p (m + n) = 0,4 (5 + 4) = 3,6 \text{ m};$$

$$L = (n - 1) l = (6,66 - 1) 3,6 = 20,4 \text{ m}.$$

2.5. METHODES PHYSICO-CHIMIQUES DE FIXATION DES SABLES MOUVANTS

Malgré l'efficacité suffisante des protections mécaniques, elles ont toutes un même défaut: il est impossible de mécaniser leur installation, d'où le coût élevé et la lenteur des travaux. C'est pourquoi il s'est avéré nécessaire de rechercher de nouvelles méthodes permettant la mécanisation des travaux. Les chercheurs ont adopté l'idée de l'application de liants.

Les recherches sur l'application des agents liants pour la structuration artificielle du sol et la prévention de l'érosion ont été entamées en Union Soviétique dans les années 1930 sur l'initiative des académiciens A. Ioffé et D. Talmoud. Les premières recherches dans ce domaine ont été effectuées par P. Verchinine, F. Koliassév, I. Revout et d'autres. Différents composés organiques dont viscosse, cellulose, hémicellulose, lignine, acides humiques, colle de tourbe, etc. ont été essayés comme agents de solification [Verchinine, 1958].

Au milieu des années 1930, les chercheurs de l'Institut de recherches agrophysiques de Léninegrad ont commencé à développer un procédé innovateur pour fixer les sables par cimentation de la couche superficielle à l'aide d'une émulsion de bitume. Les expériences ont été effectuées dans la partie sud-est du Kara-Koum et sur les sables du bassin inférieur du Dniepr [Zakharov, Révout, 1954]. L'émulsion utilisée au cours des expériences se composait de bitume et d'eau dans la proportion 1:1, et on ajoutait 9 parties d'eau supplémentaires à l'application. Le débit total de l'émulsion et de l'eau se chiffrait à 20 t/ha. L'émulsion était préparée dans un atelier spécialement aménagé, après quoi elle était pulvérisée sur la surface des sables. Une couche de sable consolidée d'une épaisseur de 8 à 10 mm se formait sous l'action de l'émulsion de bitume. Cette couche se conservait pendant deux ans. On constatait sous la croûte une élévation de l'humidité et une température de 3 à 4 °C supérieure à la température ambiante. Les pousses de la Salsola Richteri, du Calligonum ainsi que de l'orge, du mil, du pastèque et d'autres cultures percent bien la croûte. Le revêtement bitumineux contribuait donc à une rapide diffusion de la végétation arénicole sur les sables.

Les expériences avec l'émulsion de bitume ont été reprises dans les années 1970 à l'Institut des ingénieurs du transport ferroviaire de Tachkent, l'émulsion se composait de 50 % de bitume BH-IV, de 4,5 % d'émulsionneur OII-7, de 0,3 % de soude caustique et de 45,2 % d'eau. Avant d'en recouvrir le sable, l'émulsion était diluée dans l'eau dans la proportion de 1 à 7.

Ces dernières années ont vu apparaître des composés synthétiques macromoléculaires dont l'utilisation pour la structuration du sol demande des quantités des dizaines de fois moindres que dans le cas d'application de composés organiques. Nous allons donner ici-bas leur brève caractéristique.

Le polyacrylamide ПАА a été pour la première fois obtenu par M. Savitskaïa à Léninegrad à l'Institut des composés macromoléculaires de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. par synthèse de l'acide acrylonitrrique [Nerpine, Revout, 1964]. Les polyacrylamides ПАА et CII-ПАА ont été obtenus à la chaire de la chimie colloïdale de l'Université de Tachkent par voie de synthèse sur la base de l'acide acrylique [Kadyrov, Akhmédov, 1964]. Ces polymères sont élaborés sous forme de solutions et de poudre.

Le CII-8; copolymère de l'acide méthacrylique et du méthacrylami-

de, est produit sous forme de poudre qui se dissout facilement dans l'eau.

Les premières expériences avec le ПАА appliqué comme liant pour la fixation des sables ont été organisées dans les régions de Volgograd et d'Astrakhan, sur des superficies de 1 à 3 m² jusqu'à 300—500 m²; elles avaient pour but de mettre au point une technologie de travaux de fixation des sables [Gabaï, 1965]. Il a été découvert que les propriétés fixatrices des croûtes se conservent en fonction de la teneur en ПАА de 6 mois jusqu'à deux ans, leur épaisseur est de 4 à 9 cm, et la résistance au percement, au bout de 10 mois après l'application, est de 0,8 kg/cm². Les croûtes restaient facilement perméables aux précipitations atmosphériques et n'entravaient pas la pousse des graines de chiendent (*Agropyrum repens*), de *Bromus inermis*, de lyzerne et d'autres plantes.

En 1960—1965, des essais de ПАА effectués par l'Institut des déserts de l'Académie des Sciences de la R.S.S. de Turkménie en Turkménie occidentale avaient pour but de protéger les poteaux de lignes électriques contre la déflation [Nouryiev, 1967]. Des expériences identiques ont été effectuées sur l'un des tronçons du chemin de fer de l'Asie Moyenne [Gorbatchiova, 1964]. Les chercheurs ont appliqué une solution aqueuse (1—3 %) du polymère ПАА à raison de 3 l/m². Des croûtes de 2 à 5 cm d'épaisseur se conservent de 1 à 4 ans en fonction de la teneur et du débit du ПАА. Les boutures de *Calligonum* se sont bien adaptées à la surface enduite. Une humidification supérieure à la normale a été observée sous la croûte, et en été, la température diurne y était plus basse que sur les sables non traités.

Produits de la série «K». En 1958, les chercheurs de l'Institut de la chimie près l'Académie des Sciences de la R.S.S. d'Ouzbékistan ont obtenu des agents solifiants actifs sur la base du polymère synthétique de polyacrylonitrile et d'acide acrylique classés comme le groupe «K»: K-3, K-4, K-5, K-6, K₂-6, K-9, AKC, AKM, etc.

Outre l'application à titre d'agents solifiants, les polymères du groupe «K» ont été essayés comme fixateurs dans la lutte contre la déflation des sables. A partir de 1964, des essais de laboratoire et de terrain ont été entrepris à l'Institut des déserts de l'Académie des Sciences de la R.S.S. de Turkménie avec les polymères de la série «K»: K-4, K-6, K-9, afin d'étudier leur capacité de fixer les sables mouvants [Nouryiev, 1967]. La concentration de la solution est de 1 à 2 % et moins, et le débit est de 1,5 à 3 l/m². Les essais de terrain dans la région du canal du Kara-Koum et en Turkménie occidentale (protection des poteaux de lignes électriques) ont montré que la couche protectrice de 20 mm d'épaisseur possède une résistance élevée au percement (de 10 à 12 kg/cm²), résiste bien aux vents violents, n'empêche pas la germination des graines et reste perméable aux précipitations atmosphériques. Elle atténue les oscillations de température sous la croûte en été et en hiver.

Les polymères K-4 et K-6 ont été essayés sur des champs de coton en Asie Moyenne afin d'étudier leur capacité de protection contre

l'érosion par l'irrigation [Mirzajanov, Mailibaev, 1974]. Avant l'arrosage, le fond des rigoles était enduit de polymères K-4 ou K-6 (30 à 40 kg/ha). Cela empêchait l'érosion du sol et favorisait de meilleures récoltes de coton (hausse de 5 à 6 quintaux par hectare).

Le K-4 est un produit de saponification du polyacrylonitrile par des solutions alcalines, et le K-6 est un produit de saponification du polyacrylonitrile par le monosilicate de sodium en proportion de 1:5.

Le K-9 est un produit de saponification des déchets de la fibre «nitron» par l'hydroxyde de sodium. Ces polymères, facilement solubles dans l'eau, ont été étudiés au laboratoire des sables mouvants de l'Institut des déserts de l'Académie des Sciences de la R.S.S. de Turkménie. Les chercheurs ont déterminé leurs propriétés fixatrices: résistance mécanique, résistance à l'érosion éolienne, vitesse d'infiltration, degré de pénétration des polymères dans le sable, etc., et ont constaté que les propriétés des K-6 et K-9 sont sensiblement identiques à celles du K-4.

L'Institut des déserts de l'Académie des Sciences de Turkménie développe une méthode de fixation des sables mouvants par des suspensions argileuses traitées par les polymères de la série «K», ПАА et le latex [Nouryiev, 1969]. Le revêtement est formé par arrosage à raison de 4 l/m². Les essais de terrain ont montré que les polymères préviennent complètement le fendillement de la croûte argileuse par le dessèchement et qu'en même temps, la croûte n'empêche pas la montée de jeunes pousses et augmente la résistance du sable à la déflation. La résistance mécanique de la croûte argileuse traitée par les polymères est de 7 à 8 fois supérieure à celle sans traitement préalable. La couche sous la croûte est toujours mieux humidifiée et a un régime de température favorable, ce qui crée des conditions optimales pour le développement normal des plantes.

Des latex synthétiques, dispersions aqueuses de polymères obtenus par polymérisation en émulsion de monomères sont utilisés pour la fixation des sables et la lutte contre l'érosion éolienne sur les sols légers. Les latex APM-15 et CKC-30 produits par l'usine de caoutchouc synthétique de Soumgait sont les plus employés.

Le latex de divinyle-styrène APM-15 est obtenu par copolymérisation de divinyle et de styrène et est produit sous forme d'émulsion aqueuse (16–22 %). L'application d'une solution de concentration de 2 à 16 % à raison de 3 l/m² assure une profondeur d'imprégnation de la couche de sable de 7 à 18 mm. La résistance au percement de la croûte est de 2 à 3,6 kg/cm². En été, la température sous la croûte est légèrement inférieure à la mesure de référence.

On obtient de meilleurs résultats en diluant les latex par l'huile à broches ou l'huile de vaseline dans la proportion de 1 à 5 ou de 1 à 10. Après le traitement du sol par une telle solution de concentration de 1,2 à 3 % à raison de 100 à 150 kg/ha, la surface résiste bien à un vent de 20 m/s [Révout et al., 1969].

Des recherches dans le domaine de la protection des sols sujets à la

déflation par le latex CKC-65 ГИ produit par l'Usine de caoutchouc synthétique de la ville d'Omsk ont été effectuées à la station agricole d'essais de Koulounda. La surface du sol a été enduite d'une solution aqueuse de latex (concentration de 2,5 à 5 %). Un dosage de 75 à 150 kg/ha préserve le sol pendant trois ou quatre mois. Les expériences ont montré une diminution de l'évaporation.

Des variantes améliorées de produits dérivés de la lignine ont été également proposées pour la fixation des sables et la structuration du sol. Ces produits, connus sous l'appellation de ALS (acrylatoligninosulfonates), sont obtenus par modification chimique de la nitrolignine, déchet des usines de l'hydrolyse, par copolymérisation induite du méthacrylate et d'autres éthers acides acryliques et méthacryliques.

Les essais de laboratoire ont démontré que ces produits possèdent la propriété de fixer les sables. Même à petites doses, ils forment une croûte non altérable par l'eau et résistante au vent. Les chercheurs poursuivent leurs expériences sur les ALS.

Des polymères solubles dans l'eau ont été synthétisés à la fin des années 1960 à partir de déchets pétrochimiques. Ce sont des pâtes claires contenant de 2 à 6 % de substance sèche. Des expériences ont été effectuées sur les sables de la presqu'île d'Apchéron. Deux ionomères «VO», sel de sodium du polacrylonitrile hydrolysé, et «L» ont été essayés. L'ionomère «VO» s'est avéré plus efficace à cause de ses propriétés de solification [Amiraslanov et al., 1974]. Une croûte résistante se forme sur les sables. Le dosage recommandé est de 100 à 200 kg/ha pour le «VO» et de 75 à 150 kg/ha pour le «L» (substance sèche).

Il a été établi qu'avant la pulvérisation les ionomères doivent être dissous dans l'eau à une concentration de 0,4–0,6 %, ce qui correspond à 15–40 t de solution. Les expériences effectuées ont montré que la croûte qui se forme, bien que résistante au vent, résiste peu à l'action de l'eau et reste fragile. Il a suffi de 40 à 50 mm de précipitations pour sa destruction complète [Podgornov, 1980].

Un autre procédé de fixation des sables utilisant l'émulsion de résine indénoalkylaromatique s'est avéré prometteur. La concentration de l'émulsion est d'au moins 25 % pour la dosage de 300 g/m² de résine pure ce qui correspond à 12 t de solution par hectare. Cela donne l'épaisseur de la couche fixée égale à 8 mm, la résistance au percement au bout de 4 mois de 18 kg/cm² et la longévité de la croûte dépassant trois ans.

Parmi les agents fixateurs des sables, les pétroles bruts occupent une place de choix en U.R.S.S. aussi bien qu'à l'étranger. Les pétroles riches en résine se sont avérés les plus efficaces.

Le pétrole du gisement d'Arlan, au nord-ouest de la Bachkirie, contient jusqu'à 3,6 % de soufre. En 1971, le pétrole d'Arlan a été utilisé pour la fixation des sables (sur 50 ha) dans les régions d'Astrakhan et de Stavropol. Le pétrole a été appliqué à l'aide du pulvérisateur OBT-1 tiré par tracteur à raison de 4 à 6 t/ha. La température ambiante minimale est de 2 °C. La dose de 5 t/ha garantit pour les sables précaspiciens

la conservation de la croûte pendant 2 ans. Les travaux ont été accompagnés de semis et de plantation de cultures qui poussent bien sur le sol sableux: avoine, Calligonum, tamaris, Haloxylon aphyllum, etc.

On a remarqué que sur les terrains de sables mouvants traités de pétrole d'Arlan la migration a été arrêtée au bout de deux ans et que le danger d'ensablement des fermes d'élevage a été éliminé. Les arbrisseaux de 1,2 à 1,4 m de hauteur plantés en lignes diminuaient de 90 % le transport de sable.

Le pétrole de la presqu'île de Mangychlak se classe parmi les pétroles lourds et riches en résine. En 1974, il a été utilisé pour fixer les sables lors de la construction de l'oléoduc Ouzen-Gouriev. A titre d'expérience, on a fixé 1,3 km le long de l'oléoduc.

Les recherches ont prouvé qu'une plus large utilisation du pétrole de Mangychlak donnerait de bons résultats dans la fixation des sables mouvants sur les ouvrages linéaires. Il n'a pas d'effet herbicide sur les graines des plantes enterrées sous la couche imprégnée [Fazilov, 1972].

Les pétroles du gisement de Nébit-Dag. Au début des années 1960, les chercheurs des chantiers pétroliers de Nébit-Dag, avec l'aide de l'Institut des déserts de l'Académie des Sciences de la R.S.S. de Turkménie, ont fixé les sables mouvants au moyen du pétrole le long des lignes électriques et des lignes de télécommunications. Le rayon de fixation des sables, autour des poteaux des lignes à haute tension Djebel-Kotourdépé et Kotourdépé-Barsa-Guelmès était de 6 à 9 m et le débit de 3 l/m².

Autour des poteaux traités par le pétrole de Nébit-Dag, déjà pendant la première année, la migration des sables a été pratiquement arrêtée et la croûte s'est conservée pour 10 ans.

En 1962—1963, dans la région de Fergana, on a essayé le déchet qui se dépose au fond et sur les parois des réservoirs de pétrole (600 à 800 g/m²). Ce revêtement a bien résisté à un vent de 30 m/s, et les plantes arénicoles le perçaient facilement. La croûte s'est conservée pour 6 ans [Mirzajanov, Mailibaev, 1974].

L'Institut des déserts de l'Académie des Sciences de la R.S.S. de Turkménie, au cours des années 1960, a entrepris des essais de laboratoire et de terrain pour la fixation des sables à l'aide de pétrole et de mélanges de pétrole avec des produits pétroliers. Il a été découvert que le revêtement de surfaces sableuses est plus résistant au vent et à l'érosion lorsqu'on utilise des fixateurs à plusieurs composantes. Ces composantes sont: mélanges chauds de bitume et de mazout avec du pétrole, de goudron avec du pétrole ou de mazout avec du pétrole. Les mélanges de mazout et de bitume avec de l'essence et du kérosène vieillissent rapidement et les croûtes se lézardent.

Les composés résino-asphalténiques sont les composantes fixatrices les plus précieuses des produits pétroliers. Le bitume, le mazout et le pétrole contiennent un certain pourcentage d'huile jouant le rôle de plastifiant pour les résines et les asphaltènes. En étudiant les différents types de revêtement, les chercheurs ont trouvé plusieurs types de liai-

sons entre les particules de sable, dépendant de la nature chimique du fixateur. Ce sont:

Liaison rigide. Sous l'action de charges extérieures, ces liaisons se rompent et ne se rétablissent plus après la suppression des charges.

Liaison plastique. Les particules peuvent se déplacer sans rompre la liaison, et la rétablissent facilement une fois la liaison rompue.

Liaison élastique. La perturbation de ce type de liaison n'exige pas de charges extérieures considérables. Après la suppression des charges, les liaisons se rétablissent facilement.

Le pétrole et les produits pétroliers créent entre les grains de sable une liaison plastique, qui s'est avérée la plus favorable.

Les expériences de terrain ont été effectuées le long des lignes électriques dans la région de Nébit-Dag. Des mélanges de produits pétroliers à débit de 3 l/m² sont recommandés pour la fixation des bandes de protection le long des routes traversant les sables mouvants [Ivanov, 1975]. La composition des mélanges recommandés est la suivante:

pétrole — 50–60 %, mazout — 30–40 %, bitume routier — 5–10 %;

pétrole — 50–70 %, mazout — 30–50 %;

pétrole — 60 %, mazout — 20 %, nérozine — 20 %;

pétrole — 80–90 %, bitume — 10–20 %;

pétrole — 90 %, mazout — 8 %, bitume — 2 %.

Ces dernières années, le nérozine, résine schisteuse, a été essayé comme fixateur des sables. Il est appliqué tel qu'il sort de l'usine.

Le produit nérozine (résine schisteuse de cokéfaction partielle) est un mélange de fractions légères et lourdes d'huile de schiste obtenues lors de la décomposition thermique des schistes combustibles. Sa composition chimique est compliquée: composés azotés basiques — 0,3 %; acides carboliques — 0,3 %; phénols — 21,4 %; asphaltènes acides — 13 %; huiles neutres, hydrocarbures et composés acides de nitrile — 64 %.

En 1967, le nérozine a été appliqué dans la région d'Astrakhan pour fixer des foyers de déflation isolés sur des pâturages sableux et le long de la voie ferrée Gouriev — Astrakhan. En 1968, le nérozine a été utilisé [Gabai et al, 1971] pour la protection des gazoducs Boukhara-Oural et Asie Moyenne — Centre. Dans les conditions du Kyzyl-Koum et du Kara-Koum, le traitement du sable par le nérozine à raison de 2,5 à 3,0 t/ha donne une bonne croûte de protection.

En 1971, le nérozine a été essayé en Turkménie occidentale pour la protection des poteaux de lignes électriques. Les résultats des recherches de la laboratoire et des essais de terrain effectués pendant de nombreuses années ont montré que pour avoir une croûte résistante au vent, la consommation de nérozine dans les conditions de la Turkménie occidentale doit être de 2 à 3 l/m².

En tant que fixateur de surfaces sujettes à la déflation, le nérozine fait preuve de meilleures propriétés liantes que le pétrole brut en créant des croûtes protectrices assez résistantes au percement et avec une couche supérieure difficilement effaçable. La pulvérisation de

nérozine sous de hautes pressions donne les meilleurs résultats. Cependant, étant toxique et possédant une odeur spécifique, l'emploi du nérozine exige une attention particulière et certaines précautions. Il faut noter que le nérozine est deux fois plus cher que les produits pétroliers.

En 1973, l'Institut des déserts de l'Académie des Sciences de Turkménie a entrepris toute une série d'expériences de laboratoire et de terrain en vue de créer des croûtes résistantes au vent, obtenues sur la base d'une solution de bitume dans l'huile pour moteur et pour transformateurs usagée. Ces huiles plusieurs fois régénérées ne sont plus utilisables. L'huile seule ne contenant pas de résine ne peut créer de croûte résistante au vent, c'est pourquoi il est nécessaire d'y ajouter des substances contenant des résines et des asphaltènes, par exemple du bitume ou du mazout. L'atténuation des oscillations de température observée en été sous cette croûte est considérablement inférieure à celle que donnent les croûtes à base de polymères ou d'argile, et supérieure à celle qui est observée sous un revêtement de nérozine ou de pétrole brut. Ce type de revêtement n'est pas toxique pour les plantes.

Au VI^e Congrès international du pétrole, qui s'est tenu en juin 1963 à Francfort-sur-le-Main, des exposés intéressants ont été faits au sujet de la fixation des dunes et des sables de barkhanes à l'aide de déchets pétroliers et des méthodes de formation directe de films étanches à l'eau en produits pétroliers résineux à la surface du sol.

Les expériences d'un groupe de chercheurs anglais qui ont appliqué un mélange d'huile minérale ont abouti à donner une structure granulaire au sol sableux dans les dunes près du littoral du comté de Norfolk et dans le désert de Néguev.

Les émulsions bitumineuses ont été étudiées en détail en RDA et en RFA, où elles sont le plus souvent employées dans l'agriculture. Ces émulsions sont utilisées quoiqu'à moindre degré, pour la fixation de déblais sableux d'origine industrielle dont les talus sont enduits par pulvérisation d'émulsions à raison de 1,2 à 1,5 kg/m² avec ensemencement simultané en herbes ou plantation de plantes ligneuses [Biel-feldt, Gaebner, 1976].

L'émulsion bitumineuse est utilisée dans beaucoup d'Etats des USA comme moyen de lutte contre l'érosion éolienne des sols légers (jusqu'à 11 t/ha).

Au début des années 1960, l'industrie des Etats-Unis fabriquait des produits indexés WX-889, CR-239, Soil-Saver, Soil-Set dont les émulsions aqueuses ont été essayées sur des microparcelles de 10×10 pieds. La norme optimale pour CR-239 et WX-889 était de 2,3 gal/100 pieds² (1,0 l/m²). Le CR-239 s'est révélé le plus efficace.

Le coût de ces produits (450 à 870 dollars par ha) a empêché leur application à l'échelle industrielle.

A côté des produits sus-mentionnés, dans l'Etat de Kansas on a essayé, pour lutter contre la déflation sur les sols fortement érodés:

1. La résine synthétique anti-érosion de Swift sous forme d'émulsion aqueuse (200, 400, 800 l/ha).

2. Le coherex — émulsion de résine synthétique (282, 565, 1130 l/ha).
3. Une émulsion anionique-asphaltique (282, 565, 1130 l/ha).
4. Une émulsion huile-latex (380, 760 et 1130 l/ha).

On enduisait le sol de ces produits par bandes de 20 et de 60 cm de largeur ou à recouvrement intégral. Les terrains d'essai ont été soumis, 24 h après, au soufflage à soufflerie à une vitesse de vent de 56 km/h. Les terrains où l'on pratiquait la pulvérisation à recouvrement intégral ont donné les meilleurs résultats, même au dosage minimal, une haute résistance au vent y a été garantie durant 7 semaines. L'émulsion huile-latex s'est révélée la meilleure quant aux propriétés liantes. Une germination accélérée a été observée sur toutes les parcelles traitées par ces produits. Le coût de la fixation des sables par les produits susmentionnés était relativement élevé (570 dollars et davantage par hectare) [Letey et al., 1963].

Une mousse de carbamide-formaldéhyde hygromul, sous forme de flocons blancs est très répandue en RFA et sert à améliorer les propriétés hydrophysiques des sols légers. Elle est utilisée quoiqu'à moindre degré, pour la fixation des sables. Le produit contient jusqu'à 30 % d'azote qui, après l'application sur le sable ou sur le sol, devient partiellement accessible aux plantes. Après l'application sur le sol, l'hygromul est enterré par labour; sur le sable, il est simplement dispersé à la surface, formant une sorte de voile qui entrave la progression de la déflation. Le produit est biologiquement stérile et n'entraîne pas de pollution. Le débit est de 200 à 400 m³ de flocons par 1 ha de sable.

L'hygromul a permis de fixer et de transformer en près les sables éoliens sur une superficie de plus de 300 ha aux environs d'Anvers. Il a également servi à la fixation des dunes dans l'embouchure de l'Escaut [Fazilov, 1976].

Le curasol est une émulsion d'acétate de polyvinyle et de maléate de dibutyle. Il est produit sous forme de masse crémeuse qui se dissout facilement dans l'eau. Après l'application du curasol à la surface, la croûte qui se forme devient difficilement soluble.

Des expériences avec les variétés de curasol AE et AH ont été faites sur des microparcelles en RFA en vue de déterminer la résistance des croûtes à l'action de l'eau et d'analyser l'influence de l'humidité initiale de la couche superficielle du sable sur le degré de solification. Les dosages essayés allaient de 35 à 67 g/m². Il s'est avéré qu'à une humidité initiale de la couche supérieure de sable de 0 à 10 % (concentration du curasol égale à 1 %), l'humidité totale de la couche traitée ne doit pas dépasser 20 %.

Comme nous l'avons vu, les fixateurs des sables mouvants sont aujourd'hui très variés en U.R.S.S. comme à l'étranger. La résistance mécanique des revêtements, comme des autres systèmes dispersés, dépend des phénomènes et des processus physico-chimiques qui ont lieu à l'interface entre les composantes solides, liquides et gazeuses. Parmi ces processus, les plus importants sont: absorption, hydratation et échange d'ions. Le degré de dispersion des particules minérales, leur

composition minéralogique et l'humidité sont des facteurs majeurs pour le déroulement de ces processus. Or, ces facteurs ne sont pas constants, qu'il s'agisse des sols siliceux, argilo-siliceux, silico-argileux lourds ou argileux.

2.6. PHYTOAMÉLIORATION DES SABLES MOUVANTS

La planification des travaux de phytoamélioration sur de vastes territoires est le principe fondamental de la lutte contre les sables mouvants. Des projets détaillés s'appuyant sur les données fournies par une exploration préalable des massifs de sable à fixer doivent servir de base pour les travaux de phytoamélioration [Pétrov, 1950].

L'organisation des travaux de phytoamélioration sur les sables mouvants s'effectue par les orientations suivantes :

1. Mesures préventives favorisant l'arrêt de l'expansion des sables mouvants et excluant la formation de nouveaux massifs de sables mouvants.
2. Amélioration des sables mouvants afin de les transformer en pâturages ou terrains de sylviculture.
3. Amélioration des sables mouvants afin de protéger les ouvrages économiques de l'ensablement ou de la déflation.

Parmi les mesures de prévention, on doit entrevoir en premier lieu les mesures organisationnelles visant à régulariser l'exploitation de la végétation des terrains sableux. Sur les sables dégradés, il est nécessaire d'assurer une stricte régularisation (limitation) ou l'interdiction du passage et de l'utilisation de la végétation ligneuse comme bois de feu. Ceci est surtout important pour les massifs de sable limitrophes de terres cultivées ou d'entreprises industrielles et d'agglomérations.

A l'époque d'une mise en valeur intense des ressources naturelles des zones sableuses, il est particulièrement pertinent de procéder à des mesures de prévention visant à protéger la végétation au cours des travaux de terrassement, de la pose de gazo- et oléoducs, du transport du matériel. Ces travaux entraînent parfois la formation de nouvelles étendues de sables de barkhanes causant un grand préjudice à l'économie nationale.

L'amélioration des sables de barkhanes en vue de restaurer leur potentiel économique est possible par le semis de graines ou la plantation de brins de plantes fixatrices de sable, ainsi que d'essences conifères et feuillues en tant que protection indépendante ou s'ajoutant à des protections mécaniques et chimiques. Les espèces végétales à choisir pour le boisement des sables sont déterminées par les conditions pédo-climatiques et par l'intensité de la déflation. Ainsi, dans la partie européenne de l'U.R.S.S. d'importants massifs de pins sont aménagés sur des terrains sableux (sauf sur les terrains superhumides) dans les zones à pluviométrie annuelle supérieure à 300—350 mm.

Les plantations en courtines sont créées le plus souvent sur des terrains sableux dans les zones à pluviométrie annuelle d'au moins 250—

300 mm, dans les couloirs entre les collines de sable, aux endroits où l'exploitation de la nappe phréatique est possible.

Les plantations à coulisses d'essences feuillues sont appropriées aux sables de barkhanes où une alimentation supplémentaire en eau est garantie par la nappe phréatique, la fonte des neiges, l'écoulement local. La largeur des coulisses est de 25 à 50 m, et celle des couloirs entre les coulisses est de 100 à 150 m.

Dans la région de la mer Baltique, on cultive sur les sables dunaires le pin, le bouleau, l'aune, etc.

On choisit, pour le boisement des zones de forêt-steppe et de steppe, le pin, et sur les terrains où la nappe phréatique se trouve à une profondeur de 3-4 m au maximum le peuplier. Sur les sables aux sols ensevelis et à intercalations d'argile, dans les régions sud et sud-ouest de la partie européenne de l'U.R.S.S., on peut planter l'acacia blanc.

Sur les terrains sableux du Don, de Naryn, de l'Oural, du Kazakhstan central et oriental, les massifs boisés sont formés essentiellement de pins, et sur les terrains où les eaux souterraines sont à une profondeur de 0,5 à 1 m, ce sont les peupliers, les aunes noirs, *Hippophae rhamnoides*; le boisement des sables de Tersk-Koum, d'Astrakhan, du Daguestan et de Kalmykie se fait en plantant des peupliers, des acacias blancs, des ormes de Thomas, des éléagnées.

L'amélioration des sables de barkhanes d'Asie Moyenne est effectuée essentiellement par des plantes arénicoles.

L'amélioration des sables de barkhanes visant à protéger des ouvrages d'intérêt économique de l'ensablement ou de la déflation s'est avérée nécessaire essentiellement dans la zone désertique. Cela était lié en particulier à la construction d'ouvrages importants (voies ferrées, chantiers pétroliers, gazo- et oléoducs) dans les sables de barkhanes, ainsi qu'à la mise en valeur des terres dans le désert de sable.

La protection de divers ouvrages exige que certaines règles soient observées. Canaux, collecteurs, voies ferrées, exploitations agricoles, entreprises industrielles sont considérés protégés quand ils ne sont pas envahis de sable sous forme de barkhanes et de courants éoliens ou ne donnent pas lieu à la déflation. Pour les gazo- et oléoducs et les conduites d'eau l'accumulation de sable transporté est considérée comme un facteur positif.

Les travaux de phytoamélioration dans les sables de barkhanes seront bien plus efficaces et produiront l'effet voulu si l'on tient compte des conditions sylvicoles de différents types de sable et du caractère de l'activité économique de l'homme dans la région des travaux d'amélioration prévus. C'est pourquoi un examen détaillé des conditions de phytoamélioration doit précéder tous les travaux de fixation et de boisement des sables mouvants. Pour cela, des informations exhaustives caractérisant les conditions physiographiques et l'exploitation économique des sables doivent être recueillies pour servir de base d'un projet de phytoamélioration. Il est indispensable entre autres de répondre aux questions suivantes [Petrov, 1974]:

1. Typologie des conditions sylvicoles des territoires désignés pour la fixation et le boisement des sables. Les conditions sylvicoles dans les sables mouvants, c'est l'ensemble de tous les facteurs du milieu déterminant la croissance et le développement des plantes fixatrices de sable.

2. Elaboration des types de travaux de phytoamélioration correspondant à ceux des conditions sylvicoles.

3. Evaluation des propriétés phytoamélioratives des essences ligneuses et herbacées recommandées pour les plantations de protection, la fixation et le boisement des sables.

4. Questions organisationnelles liées à la réalisation des mesures de phytoamélioration prévues (protection de la végétation des sables, organisation de pépinières, mécanisation des travaux, allocation de terres pour le stockage des graines et des boutures, etc.).

5. Etude de l'expérience des travaux de phytoamélioration en cours dans les régions en question.

L'éclaircissement de ces questions importantes permet de choisir correctement les méthodes de phytoamélioration des sables mouvants et de préciser les tâches concrètes qui se posent devant les spécialistes de phytoamélioration.

Dans les zones arides du globe terrestre, on peut distinguer les principaux types de conditions sylvicoles suivants:

1. Sables à humidification atmosphérique suffisante (pluviométrie dépassant 250 mm, évaporation d'environ 1600 mm) assurant les processus naturels d'envahissement des sables par des plantes arénicoles mésophiles.

2. Sables des déserts à humidification atmosphérique assurant les processus naturels d'envahissement par des plantes arénicoles xérophi les arbustives et herbacées (pluviométrie de 100 à 250 mm, évaporation d'environ 2300 mm).

3. Sables des déserts à humidification atmosphérique insuffisante, n'assurant pas d'envahissement spontané même par la végétation herbacée (pluviométrie inférieure à 100 mm, évaporation de 2800 mm).

Les groupes énumérés peuvent se rencontrer dans les limites d'une seule et même zone physiographique, ainsi que dans des zones différentes en fonction du régime de l'humidification atmosphérique. Dans le cadre de chaque groupe, on dégage des types de conditions sylvicoles en fonction de la nature des roches sous-jacentes, de l'épaisseur des sédiments éoliens, de la profondeur de la nappe phréatique et de sa salinité.

En particulier, dans les déserts et les semi-déserts de sable on peut distinguer des groupes de types de conditions sylvicoles:

1. Sables mouvants d'épaisseur différente reposant sur des roches métamorphiques ou sédimentaires imperméables des crêtes de basses montagnes. Généralement, ils sont d'origine alluviale. La nappe phréatique n'existe pas.

2. Sables mouvants d'épaisseur différente reposant sur des plaines silico argileuses. Les eaux souterraines se trouvent à une grande profondeur et ne sont pas accessibles aux plantes. Ce type de sables se rencontre assez souvent.

3. Sables mouvants d'épaisseur différente reposant sur des grès crayeux compacts perméables; les eaux souterraines sont à une profondeur inaccessible aux plantes.

4. Sables mouvants d'épaisseur différente couvrant les pentes de collines de lœss. La nappe phréatique est inaccessible aux plantes.

5. Sables mouvants d'épaisseur différente reposant sur des dépôts proluviaux dans les piémonts. Les eaux souterraines très profondes ne sont pas accessibles aux plantes, mais il y a une humidification supplémentaire par les eaux torrentielles.

6. Sables mouvants d'épaisseur différente reposant sur des dépôts lacustres et alluviaux sableux meubles. Les eaux souterraines salines sont à une profondeur qui les rend accessibles aux plantes.

7. Sables mouvants d'épaisseur différente reposant sur des dépôts lacustres et alluviaux sableux meubles de tous les déserts. Les eaux souterraines douces sont accessibles aux plantes.

8. Sables mouvants d'épaisseur différente reposant sur des terres agricoles abandonnées et autrefois arrosées dans les vallées et les deltas de rivières des régions arides aux sols fertiles. Les eaux souterraines, souvent douces, sont accessibles aux plantes.

Chacun de ces groupes comprend plusieurs sous-types de sables, subdivisés selon d'épaisseur des dépôts de sable en: a) sables des barkhanes basses (jusqu'à 1 m de hauteur); b) sables des barkhanes moyennes (jusqu'à 3 m de hauteur); c) sables des barkhanes hautes (dépassant 3 m de hauteur).

La gamme des plantes fixatrices de sable utilisées pour la phytoamélioration, est représentée, en règle générale, par des arbustes autochtones et des herbes vivaces et annuelles. Toutes ces plantes sont résistantes à la chaleur et à la sécheresse. D'habitude, une humidification par les précipitations atmosphériques leur suffit, mais elles profitent des eaux souterraines quand c'est possible.

3. ORGANISATION DES ETUDES ET DES ACTIONS PRATIQUES EN MATIERE DE LA PHYTOAMELIORATION DES SABLES MOUVANTS

3.1. ETUDE DE LA DEFLATION ET DU TRANSPORT DE SABLE

L'activité éolienne aboutissant à la déflation, au transport et au dépôt de sable représente le facteur principal du façonnement du relief dans un désert de sable. En pratique, le transport et le dépôt de sable provoquent l'ensablement, et la déflation engendre le déchaussement de divers ouvrages d'art. C'est pourquoi il est très important de connaître le sens et l'intensité de ces processus.

Les processus éoliens qui, démembraient et triaient les assises originelles depuis des époques éloignées, de sable meuble et formaient le relief éolien contemporain qui, sur de grandes étendues, a acquis aujourd'hui une certaine stabilité à l'érosion éolienne et un équilibre dynamique. Un certain nombre de facteurs d'origine naturelle y contribue, dont l'envahissement du modèle éolien par la végétation et la consolidation de la surface des sables.

Le système assez stable du désert peut être perturbé par quelque facteur naturel ou par l'activité économique de l'homme. La masse de sable meuble débarrassée du manteau végétal se met en mouvement sous l'action du vent et s'expose à une intense déflation. Si ce processus prend naissance à proximité d'ouvrages d'intérêt économique, il est facile d'en imaginer les conséquences.

Les reliefs éoliens couverts de végétation dans les conditions naturelles (sans influence de facteurs humains) subissent une déflation dans une mesure différente, mais se caractérisent, en général, par une haute stabilité due à l'existence du manteau végétal. Un relief éolien continu souffre peu de la déflation naturelle. Par exemple, sur les sables ondulés et les massifs de sable étendus en manteau, les traces de déjection, de transport et d'accumulation de matériau éolien sont généralement absentes. L'intensité de la déflation des reliefs éoliens fortement morcelés est différenciée selon les éléments du modèle. Une chaîne de sable subit peu de déflation dans la partie inférieure des versants et dans les

couloirs interdunaires. La faible déflation des versants s'explique par l'existence d'un tapis herbeux relativement dense, et les bas-fonds jouissent, en outre, d'une grande teneur en particules poudreuses et d'une faible profondeur des dépôts originels faiblement compactés ou de la nappe phréatique constituant la base locale de la déflation. Les sommets des chaînes et la partie supérieure des versants présentent des traces de déflation sous forme de plaies et de manteaux de sable et même de barkhanes. Le renforcement de la déflation sur les sommets des chaînes résulte du dessèchement des sols et d'une action plus profonde du vent.

L'élaboration des mesures économiques et efficaces pour protéger les ouvrages d'art contre l'ensablement et la déflation est inconcevable sans information fiable sur la stabilité de la surface du sable à l'érosion éolienne.

Cette information sera plus ou moins détaillée selon l'avancement du projet de construction des ouvrages. Ainsi, au stade du rapport de faisabilité d'un ouvrage, quand la localisation du chantier ou du tracé constitue un élément important, la caractéristique de la stabilité des sables à l'érosion éolienne doit s'étendre sur une superficie considérable, tout en restant quelque peu schématique, c'est-à-dire sans tracé de contours précis. L'échelle de la carte doit être, naturellement, petite.

Dès que l'emplacement de l'ouvrage est déterminé (stade du projet technique), on ne peut se passer d'une étude détaillée du territoire adjacent, c'est-à-dire d'une carte ou schéma à grande échelle reflétant toute la variété des formes et l'intensité de la déflation.

L'expérience de la construction dans les sables montre que l'on ne peut recourir à des mesures de protection efficaces qu'après l'achèvement des travaux, quand la surface initiale des sables est transformée.

Généralement, on étudie et cartographie la stabilité des surfaces de sable à l'érosion éolienne, quand l'ouvrage est fini. On élabore alors une classification, et la légende de la carte doit tenir compte non seulement des types naturels de sable reflétant le processus naturel de façonnement du relief éolien, mais aussi des formes (types) d'origine anthropique des surfaces de sable apparues à la suite des travaux de construction. Ce sont les sables dits «technogènes».

Pour l'établissement de cartes de stabilité à l'érosion éolienne, il est important d'élaborer une classification des processus d'érosion éolienne.

En établissant des classifications de relief des déserts de sable aux fins cartographiques, la majorité des chercheurs divisent toutes les formes éoliennes selon le degré de stabilité de la surface, en deux (embroussaillées et dénudées) ou trois (embroussaillées, semi-embroussaillées et dénudées) catégories. Dans le dernier cas la catégorie des formes semi-embroussaillées comprend l'ensemble de barkhanes et de buttes que est une étape de transition des formes embroussaillées à celles dénudées ou vice-versa. Cependant, il existe, dans un désert de sable, à côté des catégories mentionnées, nombre de modèles éoliens dont la

surface sableuse connaît un niveau d'érosion ou d'envahissement par les plantes qui ne correspond à aucune catégorie. Il est pourtant important de connaître le degré de mobilité du substrat, tant pour prévoir l'évolution du processus éolien que pour élaborer des mesures préventives concrètes à la mise en valeur économique du terrain.

Les classifications basées uniquement sur les indices géobotaniques ne permettent pas de déterminer de manière suffisamment complète le niveau de l'érosion éolienne d'une surface sableuse. Il est important, à cet effet, de se servir, à côté de la méthode géobotanique, de la **méthode géomorphologique** qui permet d'étudier l'intensité de la déflation selon la forme et la masse du sable accumulé [Orlov, 1938].

L'accumulation de sable étant le résultat de la déflation et du transport, son volume peut servir de critère de l'intensité du processus. Donc, plus le volume du sable accumulé est grand, plus la déflation est intense. Ainsi, de petites accumulations étendues sur une forme éolienne couverte de plantes témoignent d'une déflation faible, tandis que la présence de barkhanes isolées accuse une déflation plus intense. Dans les déserts, l'accumulation a lieu généralement à proximité des sources de déjection de sable, mais il y a des exceptions. Il s'agit des cas où les sables éoliens sont soufflés sur des surfaces dures ou compactes (takyr, plateaux, solontchaks, etc.), où ils deviennent très mobiles. Le sable peut être transporté à de grandes distances si le régime éolien est caractérisé par un vent dominant. Ces cas particuliers doivent être analysés séparément.

Des rides sur le sable sont un indicateur sûr du transport de sable au-dessus d'une surface dénudée ou plus ou moins recouverte de végétation. Seule une surface fortement gazonnée, recouverte de dense végétation arbustive et, surtout, herbacée ne présente pas de traces de rides. Néanmoins, on ne peut pas affirmer l'immobilité absolue du sable sur les formes éoliennes embroussaillées, puisque l'horizon superficiel desséché, d'une épaisseur d'environ 5 cm, est dépourvu de gazon consolidant et on peut observer un certain déplacement du substrat sableux sous l'action de vents violents. Ce type de transport n'est pourtant pas dangereux pour les ouvrages d'intérêt économique.

Nous proposons la classification suivante des types de surfaces sableuses selon le degré de déflation:

1. **La déflation est absente:** la surface embroussaillée n'a pas de rides de sable.

2. **La déflation est faible:** il y a des rides de sable et des accumulations en manteau, mais sans crête caractéristique.

3. **La déflation est modérée:** on trouve des rides de sable, des manteaux de sable, des crêtes et de rares barkhanes de petite taille (0,5 à 1 m).

4. **La déflation est considérable:** des barkhanes et des chaînes de barkhanes alternant avec des formes embroussaillées (collines).

5. **La déflation est forte, totale:** présence d'un champ de barkhanes dénudé avec des spécimens unitaires de plantes dans les couloirs interdunaires.

Le premier type (absence de déflation) se rencontre sur des formations éoliennes embroussaillées faiblement découpées: accumulations de sable légèrement ondulées, tas et manteaux de sable. Les accumulations légèrement ondulées et les sables en manteaux sont associés essentiellement à la périphérie des massifs de sable, tandis que les sables en tas se trouvent à la périphérie de terres irriguées et de solontchaks et au bord de lacs. Dans les conditions naturelles, une surface sableuse recouverte de végétation ne subit pas de déflation. Cependant, une détérioration mécanique de la couche supérieure gazonnée peut provoquer des plaies de déflation sur les sables légèrement ondulés et le sable peut s'accumuler sous forme de manteaux, voire de petites barkhanes.

Le deuxième type (déflation faible) est le plus largement représenté dans le désert de sable. Il est typique pour les chaînes de sable et leurs combinaisons diversement déchiquetées: embroussaillées (versants et dépressions) et peu embroussaillées (sommets). Le degré de risque de déflation est différencié selon les éléments du relief. Les parties inférieures des versants et les dépressions des formes éoliennes sont moins érodées que les sommets.

Le troisième type (déflation modérée) est associé aux chaînes de sable peu embroussaillées fortement découpées. Les couloirs interdunaires et les parties inférieures des versants ne sont pas exposés à la déflation. Les sommets et la partie supérieure des versants présentent beaucoup de barkhanes.

Le quatrième type (déflation considérable) est observé le plus souvent sur des sables moyennement découpés et sur des ensembles de barkhanes et de buttes. Le risque de déflation est différent selon les types du relief. Les barkhanes sont exposées à une déflation totale, tandis que les collines subissent une déflation faible ou partielle. Les couloirs interdunaires sont le plus souvent embroussaillés, la migration des barkhanes est faible. On observe généralement une restructuration des crêtes et un transport intense de sable par le courant éolien.

Le cinquième type (déflation forte, totale) est celui des massifs de sable de barkhanes. Le transport de sable se fait par courant éolien chargé de sable et par migration des formes éoliennes. Ce type comprend deux sous-types: les sables de barkhanes reposant sur un substrat sableux meuble et les sables de barkhanes reposant sur des roches compactes (takyr, sors, affleurement de roches de base, etc.). Le deuxième sous-type est caractérisé par une plus grande mobilité et de plus mauvaises conditions de végétation.

La méthode proposée pour l'étude et la cartographie des surfaces sableuses permet d'obtenir les caractéristiques de l'intensité et de l'orientation de la déflation sur un terrain donné. Cela permet à son tour, de rédiger des recommandations bien fondées sur la localisation des ouvrages, de faire une évaluation préalable de la disposition et du volume des mesures de protection nécessaires. En d'autres termes, cela fournit l'information de base nécessaire pour le rapport de faisabilité pour un projet de construction d'ouvrage d'intérêt économique.

Les données fournies par la photographie aérienne permettent d'étudier de manière planifiée et à grande échelle les processus de déflation dans le désert et d'établir des cartes de haute précision fixant la diffusion de divers types de surfaces de sable. Cette technique réduit considérablement le volume des travaux de terrain coûteux et les délais d'établissement des cartes, tout en améliorant la qualité des documents cartographiques.

A l'étude et à la cartographie de la stabilité à l'érosion éolienne au niveau régional à des fins de mise en valeur économique du désert, il importe de délimiter les terrains potentiellement résistants à la déflation par leur résistance mécanique due surtout à la lithologie des roches-mères. Ces terrains sont favorables à l'implantation d'ouvrages de différente destination.

Selon la classification proposée, ces terrains se rapportent aux surfaces qui ne donnent pas lieu à la déflation. Au Kara-Koum, ils sont représentés par des affleurements de kyrs, des fragments de plaine deltaïque argileuse, des surfaces de plateaux.

L'élaboration des mesures de protection d'un ouvrage donné se base sur les résultats de l'étude et de la cartographie de la stabilité à l'érosion éolienne d'un territoire plus vaste pour lequel on procède à une détermination plus détaillée des types de sable observés. A côté des cinq types décrits plus haut, leur différentes combinaisons, formes intermédiaires ou sous-types peuvent être déterminées. Sur de telles cartes, les types des surfaces sableuses sont groupés en deux catégories:

1. Sables n'exigeant pas de fixation.
2. Sables exigeant une fixation.

Les surfaces sableuses à gazon dense et bien conservé ou à plaies de déflation rares se rapportent à la première catégorie. Ils ne forment **pratiquement** pas de transport de sable. Les surfaces à gazon altéré et donnant lieu à des accumulations de sable depuis les manteaux jusqu'aux barkhanes se rapportent à la deuxième catégorie, dans laquelle on relève de 8 à 9 types de surfaces de sable.

Le choix de l'échelle et de la superficie du territoire à cartographier est très important pour les études de faisabilité et l'élaboration des mesures de protection. La pratique a montré que, pour l'étude de faisabilité l'échelle de la carte ne doit pas être inférieure au 1:500000, tandis que la superficie est fonction des objectifs fixés et du programme des recherches. Pour l'élaboration des mesures de protection d'un ouvrage d'intérêt économique donné, l'échelle ne doit pas être inférieure au 1:20 pour les ouvrages linéaires (pipe-lines, routes, lignes électriques) et au 1:2000 pour les chantiers étendus. Si la superficie du terrain étudié autour d'un chantier étendu le permet, l'échelle du levé doit être la plus grande possible s'approchant autant que possible de l'échelle du dessin d'exécution du projet technique, ce qui permet d'indiquer sur la carte toutes les actions de protection prévues (leur nature et paramètres).

La longueur de la bande cartographiée des ouvrages linéaires dépend de la longueur du tracé, tandis que sa largeur est fonction de la zone d'influence qui, selon l'état de l'érosion éolienne des sables, peut aller d'une dizaine à plusieurs centaines de mètres. Plus la surface sableuse est uniforme, plus la bande cartographiée est étroite. La surface cartographiée du chantier est déterminée aussi par la superficie des sables remués pendant les travaux de construction.

Les résultats de l'étude de la stabilité des sables à l'érosion éolienne et la carte qui les reflète ne valent que pour un certain laps de temps. Ils doivent être mis à jour tous les 5 ans. L'information contenue dans les cartes caractérisant l'état de la surface sableuse face à l'érosion éolienne permet de planifier les mesures de protection nécessaires avec une fiabilité suffisante. Pourtant, ces cartes ne fournissent pas d'information quantitative sur les processus s'y déroulant, ce qui rend plus compliqué la détermination de la largeur de la zone de protection du côté au vent et sous le vent des ouvrages.

La caractéristique quantitative de l'intensité de la déflation est établie par le traitement en laboratoire des données sur le régime éolien, ainsi que par des observations sur des terrains stationnaires, où l'on procède à la détermination instrumentale des processus de déflation par relevé du relief sur des profils et des parcelles de un à deux hectares de superficie, ainsi que par des observations sur la quantité de sable transporté par le courant éolien.

Au laboratoire, on analyse sous tous les aspects le régime éolien, puisque c'est le vent qui est le facteur essentiel de la formation du relief. L'étude du régime éolien du désert permet de comprendre les processus géomorphologiques et, en particulier, ceux de migration et d'accumulation de sable.

Il existe aujourd'hui plusieurs méthodes de traitement des données sur le vent, dont la plus simple et la plus répandue est décrite par Drozdov (1957). Cette méthode utilise la fréquence des vents de direction donnée définie par un des 8 ou 16 aires et les valeurs moyennes des vitesses du vent pour ces aires. Une série d'observations de 10 à 20 ans, ce qui est généralement le cas, permet d'obtenir des résultats stables. Les valeurs moyennes de la vitesse des vents, compte tenu de leur direction reflètent bien le régime éolien général d'un territoire donné et permettent de décélérer les vents dominants, c'est-à-dire ceux qui peuvent être cause d'ensablement et de déflation.

Cette méthode tout comme les cartes de l'érosion éolienne, ne donne pas de caractéristique quantitative des processus. Si, au lieu des vitesses moyennes du vent et de la fréquence des vents de différentes aires qui sont à l'origine du transport de sable, on prend la somme des vitesses des vents dans une aire déterminée le problème de la caractéristique quantitative peut être partiellement résolu. Mais dans ce cas, il faut tenir compte de ce que les grains de sable de différentes dimensions commencent à se déplacer seulement quand la vitesse du vent atteint une valeur donnée (vitesse de seuil) (tableau 8).

Début du déplacement de sable en fonction
des dimensions des grains

Type de sable	Diamètre des grains, mm	Vitesse du vent, m/s
Sable fin	0,1 à 0,25	4,5 à 6,7
Sable moyen	0,25 à 0,5	6,7 à 8,7
Sable à gros grain	0,5 à 1,0	9,8 à 11,4
Sable grossier	1,0 à 2,0	11,4 à 13,0

D'habitude, nous avons à notre disposition des données de mesures météorologiques qui indiquent la direction et la vitesse du vent sur girouette à une hauteur de 10 m prises 8 ou 16 fois par jour. Etant donné que la vitesse du vent relevée par la girouette n'est pas identique à celle près de la surface (où elle est bien moindre), la vitesse de seuil, au niveau de sol est généralement déterminée par des calculs. [Gvozdkov, 1966] propose, pour calculer la vitesse du vent à une hauteur de 10 cm de la surface des barkhanes, la formule $V_{10} = 0,475 V_{1000}$ pour la surface des barkhanes; de même, $V_{10} = 0,333 V_{1000}$ pour les couloirs interdunaires takyroïdes ensablés, et $V_{10} = 0,375 V_{1000}$ pour une plaine de sable et de galets. Ici V_{1000} est la vitesse du vent à la hauteur de la girouette de 10 m.

A des fins pratiques, on adopte pour la vitesse de seuil une vitesse du vent de 5 à 6 m/s d'après la girouette, puisque c'est à cette vitesse que les grains de sable commencent à rouler sur la surface, et que la vitesse du vent est de 3,5 à 4 m/s à 10 cm du sol.

Les vitesses de seuil, comme cela a été dit plus haut, sont utilisées pour la construction des hodographes de la somme des fréquences ou des vitesses.

Pour une meilleure représentation graphique de la résultante annuelle de l'activité éolienne, on recourt à des hodographes représentant la somme vectorielle de la fréquence des vents à une échelle correspondant à la valeur de la vitesse de chaque cas observé ou à la somme des vitesses pour une certaine période d'observation. Cette méthode est souvent utilisée dans la pratique. Toutefois, les hodographes ou les roses des vents construits selon les sommes des vitesses des vents actifs, ou selon la résultante des vents pour une période, ne donneront qu'une idée générale du régime éolien de telle ou telle région. Ils permettent de juger seulement des directions des vents dominants.

Il est assez facile de construire un hodographe dans l'ordre suivant: 1. Un point arbitrairement choisi correspondant au 1^{er} janvier est pris comme l'origine. 2. La direction et la vitesse du vent sont représentées par un segment (vecteur) partant de l'origine dans la direction correspondant à celle du vent; la longueur du vecteur est proportionnelle

à la vitesse du vent observée à l'échelle adoptée. 3. Chaque cas suivant (dans l'ordre des observations) de vent assez fort est représenté par un vecteur dont l'origine coïncide avec l'extrémité du précédent. On obtient finalement une ligne brisée, parfois très sinueuse, reflétant les changements successifs dans la direction et la vitesse du vent.

L'hodographe de ce type illustre les particularités du régime éolien: plus il est long, plus le vent est actif, plus la ligne est droite, plus le vent dominant est accusé. Une ligne brisée témoigne de l'instabilité du régime éolien. Les vents violents et les tempêtes sont bien représentés sur l'hodographe par des segments plus longs.

Illustrons par un exemple concret les possibilités de cette méthode. Le tableau 9 présente les données initiales du régime éolien de la station météorologique de Répétek pendant deux mois. Le tableau 10 donne la fréquence des vents par 16 aires, la fréquence des vents actifs, la vitesse moyenne d'un vent isolé et la vitesse moyenne annuelle des vents actifs.

La fig. 5 montre la rose des vents établie pour la totalité des vents au cours de l'année. La particularité de cette rose des vents est que l'on trace les vecteurs, à partir de l'origine, de la fréquence des vents suivant l'aire de vent correspondante à une échelle déterminée (dans notre exemple, 50 vents en 1 cm). Pour une meilleure présentation, on peut relier les extrémités des rayons par des lignes droites. La rose des vents pour Répétek (1956) montre une dominance des vents des aires boréales. Des roses des vents identiques peuvent être construites pour les vents actifs, etc.

La fig. 6 montre un hodographe (construit selon la méthode présentée plus haut) de l'activité résultante des vents actifs pour deux mois (tableau 9). Les vents actifs ont donné une courbe montrant qu'en janvier-février les vents austraux dominant à Répétek et rendent possible une migration des sables vers le nord.

Les données sur le régime éolien peuvent être traitées également sur la base de l'énergie du vent. La majorité des chercheurs conviennent que l'énergie est proportionnelle au cube de la vitesse.

Pour faciliter le maniement des indices de l'énergie du vent, L. Dobrine a proposé, en 1965, des coefficients reflétant la capacité énergétique du vent de telle ou telle vitesse, en adoptant pour l'unité le cube de la vitesse du vent de 4 m/s (tableau 11).

Cette information est ensuite traitée suivant la méthode exposée plus haut (construction de l'hodographe). Cependant, cette information, elle non plus, ne fournit pas d'indices quantitatifs (m^3/m) du transport de sable, mais indique avec une grande fiabilité la direction du transport total de sable, ainsi que sa répartition saisonnière.

Les données obtenues sont de très grande valeur et l'on y recourt aux étapes préalables de la conception des mesures de protection, notamment du rapport de faisabilité, de la détermination des dimensions de la zone de protection, la direction du déplacement du chantier, etc.

Tableau 9

Régime éolien à la station météorologique de Répétek
(janvier-février 1956)

Jour	Direction et vitesse du vent, m/s							
	Janvier				Février			
	1h	7h	13h	19h	1h	7h	13h	19h
1	—	—	O-3	NO-6	SSE-4	ONO-4	O-7	NO-4
2	NO-5	NO-3	NO-1	—	NO-1	—	NO-5	NO-4
3	N-1	E-2	NE-3	ENE-1	SSE-7	SSE-4	S-9	S-9
4	—	—	N-1	NE-1	SSE-6	S-1	SSO-2	—
5	NNE-1	NE-1	N-1	—	SE-1	SE-1	SE-4	—
6	—	—	NNE-2	—	—	—	NO-3	—
7	—	—	O-1	—	E-6	SE-3	SE-9	SE-8
8	—	—	N-1	N-2	SE-10	SE-4	SE-8	S-1
9	NE-1	E-1	E-5	—	SE-1	SSO-3	NO-3	—
10	NE-1	NE-1	SE-2	—	—	ESE-1	ESE-3	NE-1
11	SE-3	ESE-3	S-3	—	SE-1	SE-1	SE-1	SO-1
12	—	—	E-1	—	O-5	NO-4	NO-5	NO-6
13	—	O-1	SO-1	—	O-5	O-3	O-2	SO-3
14	—	NE-1	NE-1	—	SO-1	SSO-2	SSE-3	SE-1
15	SO-7	O-3	O-1	N-2	N-5	O-2	SO-1	—
16	O-1	N-1	SO-4	O-5	—	—	SSE	N-4
17	O-5	—	SO	—	N-4	NO-3	N-2	N-2
18	NE-2	NNE	N-1	NE-1	N-2	N-2	N-4	N-3
19	—	—	SE-1	SE-1	NNE-1	N-1	ENE-3	NE-3
20	—	SE-3	S-3	—	NE-1	NE-1	N-1	N-1
21	E-2	—	O-1	—	NE-2	NE-3	E-3	N-5
22	—	—	NNO-1	NNO-2	N-5	NO-5	NNO-3	NE-1
23	N-2	N-2	N-1	N-1	—	N-1	ENE	ENE-1
24	—	—	O-1	NE-1	NE-3	ENE-4	NE-1	SE-5
25	N-2	O-1	SO-2	O-1	O-2	SO-3	OSO-1	NE-2
26	—	—	SO-1	—	NE-1	NO-5	NO-3	NO-1
27	E-1	E-2	SE-7	SE-3	—	—	OSO-1	N-4
28	SE-6	SSE-8	S-6	—	—	—	ESE-6	ESE-6
29	—	SE	SO-2	—	SE-9	SE-9	SE-14	SE-12
30	—	—	SE-7	SE-5	—	—	—	—
31	SE-8	SE-4	NO-5	SE-5	—	—	—	—

Il existe actuellement quelques méthodes permettant d'obtenir, en traitant les données du régime éolien, une information sur le transport quantitatif de sable. Ci-dessous, nous examinerons ces méthodes plus en détail.

Tableau 10

Activité éolienne à la station météorologique de Repétek (1956)

Direction	Fréquence des vents d'une vitesse de (m/s)													Total		Vitesse moyenne, m/s	
														Tous les vents	Actifs	de tous les vents des vents actifs	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	14	17				
N	59	41	47	33	33	7	17	7	11	1	1	1	1	258	78	3,4	6,1
NNE	14	16	21	12	11	5	8	2	1					90	27	3,3	6,1
NE	38	23	26	17	16	6	7		2	1				136	32	3,2	6,4
ENE	6	4	5	4	3									22	3	2,7	5,0
E	14	5	7	3	2									31	2	2,1	5,0
ESE	5	4	3	3	3	2			1					21	6	3,3	6,0
SE	20	14	15	8	8	9	9		3	2	2	1		91	34	4,0	7,0
SSE	2	3	16	1	4	3	2		2	2				35	13	4,2	6,9
S	10	1	3	2	4	2			3	1				26	10	3,7	6,9
SSO	2	5	2	2	2									11	2	2,9	5,0
SO	10	6	13	1			2			1				33	3	2,7	8,0
OSO	3		3	4	1		1							12	2	3,3	6,0
O	10	6	5	2	4	3	2	1	2	1				36	13	3,7	6,7
ONO	4	1	8	5	1	3	4	2	1					29	11	4,4	7,0
NO	13	13	28	8	12	8	7	1	5					95	33	5,6	6,3
NNO	3	8	11	6	6	8	4	1						48	20	4,3	6,5

Tableau 11

Coefficients (C) de l'accroissement de l'énergie
du vent en fonction de la vitesse (V)

V, m/s	C	V, m/s	C
5	2	13	34,4
6	3,4	14	43,0
7	5,4	15	53,0
8	8,0	16	64,0
9	11,4	17	77,0
10	15,6	18	91,0
11	21,0	19	113,0
12	27,0	20	125,0

Il existe plusieurs procédés d'étude quantitative des processus de déflation. La méthode géodésique devient de plus en plus répandue. Elle utilise des instruments géodésiques qui permettent d'observer, sur les ouvrages et dans les environs, l'évolution du relief.

Selon l'objectif assigné (étude générale des processus de déflation, de la dynamique de la déjection ou de l'accumulation ou bien seulement de la migration des formes éoliennes) le levé au théodolite ou au niveau est effectué une fois par an, par saison ou par mois. On choisit pour le levé au théodolite une parcelle caractéristique d'une surface de

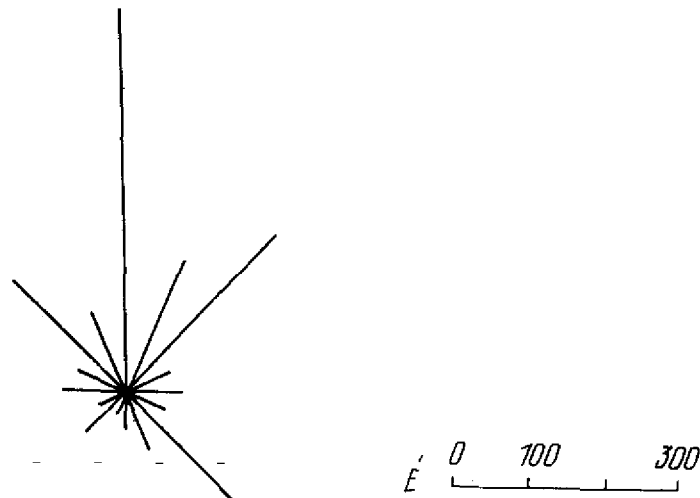


Fig. 5. Rose des vents

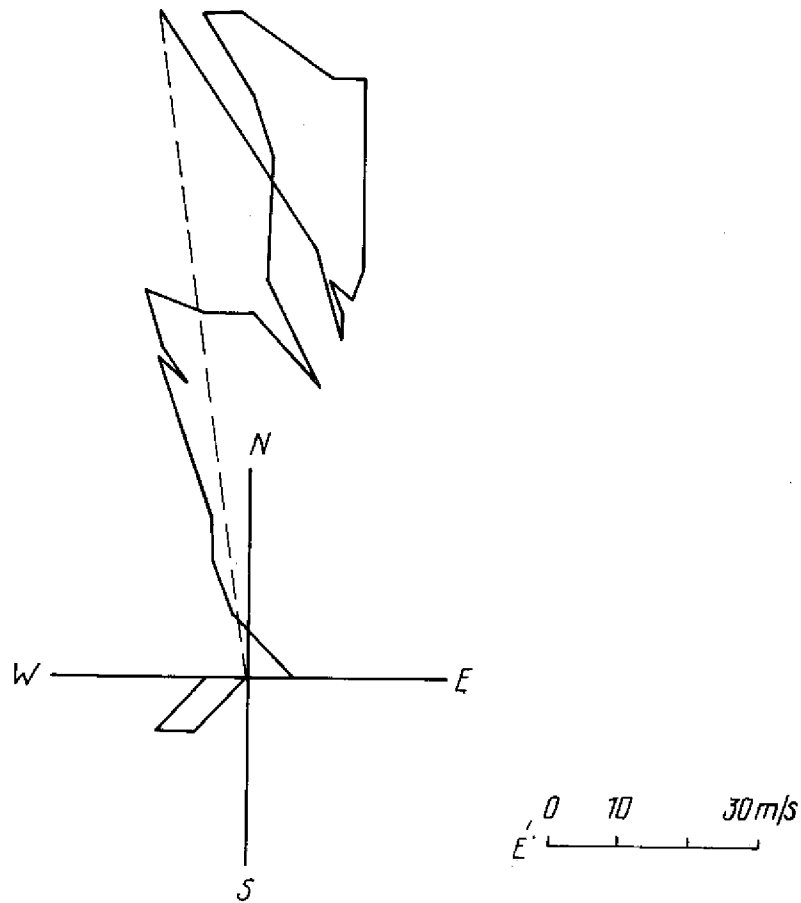


Fig. 6. L'hodographe résultant des vents actifs

1 à 2 ha, dont les angles sont marqués par des repères fixes. Les données du levé permettent d'établir des plans de la parcelle. Les plans à grande échelle permettent de procéder à l'étude comparative du transport de sable. Sur ces plans, les horizontales sont espacées de 50 cm. Au levé au niveau, on ne relève que certains points du profil, et les données obtenues permettent de tracer des profils partant d'une même origine, qui illustrent bien les changements survenus dans le relief.

Sur les deux méthodes géodésiques examinées permettant d'observer l'évolution du relief, l'information la plus complète est donnée par le levé de plan de la surface sableuse. Les plans du terrain reflètent le déplacement général des chaînes et l'influence de la dérive latérale sur le déplacement de la crête suivant le front de la chaîne, ainsi que l'effet de la végétation sur la formation générale du relief. Les profils trans-

versaux sont moins informatifs. Ils ne donnent qu'une idée du déplacement général du relief éolien. Pour résoudre un problème concret, il est conseillé d'allier les deux formes d'observation et de compléter les levés de plan par des levés de profil entre les secteurs couverts.

Ces deux procédés permettent de calculer facilement la masse de sable arrivant vers l'ouvrage.

Pour déterminer la masse de sable transporté dans le courant, on utilise, dans les conditions de terrain, un matériel des plus simples du type «barrière d'accumulation», «tranchée-piège» et capteurs de sable de diverses conceptions.

La barrière d'accumulation est un panneau plein placé sur le chemin du courant éolien. La quantité de sable accumulé des deux côtés du panneau permet de tirer une conclusion sur l'intensité du transport de sable par le courant éolien. La forme des accumulations de sable dépend de la pénétrabilité au vent des panneaux. Si celle-ci augmente, la quantité de sable accumulé devant le panneau diminue, tandis que la zone d'accumulation derrière le panneau augmente considérablement. Pour les panneaux pleins, la largeur des accumulations est égale environ à deux hauteurs du panneau; pour les panneaux perméables à 50 %, elle atteint 12 à 13 hauteurs du panneau.

Le relevé du sable accumulé près des panneaux est effectué au moins une fois par mois et immédiatement après les vents forts. Au fur et à mesure de leur ensablement, on installe de nouveaux panneaux pour des observations ultérieures.

Le relevé de la masse de sable migrant dans la couche immédiatement près du sol se fait par des «tranchées-pièges». Une tranchée est creusée en travers de la direction des vents dominants. Dans les sols meubles (sables), les bords et le fond de la tranchée sont couverts de planches, ainsi que sa partie supérieure pour éviter l'entraînement du sable par les tourbillons. Le relevé de l'accumulation de sable dans les tranchées est périodique. Il ne faut pas oublier d'évacuer de temps en temps le sable des «tranchées-pièges».

Tableau 12

Transport du sable dans le courant éolien
à la vitesse du vent de 5 m/s

Hauteur, cm	Quantité de sable, %
0 à 5	58
5 à 10	30
10 à 15	10
15 à 30	2

Les observations à l'aide de capteurs de sable fournissent les données les plus précises sur la quantité de sable transporté par le vent. Du fait que le gros du sable est transporté dans la couche immédiatement près du sol (tableau 12), ces systèmes sont recommandés seulement pour une couche haute de 50 cm.

Les capteurs de sable les plus répandus en U.R.S.S. sont ceux conçus par A. Znamenski (1950).

Les premiers capteurs sont des cylindres métalliques dont la partie réceptrice a la forme d'un cône tronqué à section du trou de réception de 10 cm². Les capteurs de sable modernes permettent de contrôler le transport du sable dans le courant centimètre par centimètre.

3.2. METHODES MATHEMATIQUES DE CALCUL DE LA QUANTITE DE SABLE TRANSPORTE

Conditions et données météorologiques de départ. Elles comprennent le régime du vent, la température et l'humidité de l'air et du sable et la pluviométrie.

Pour calculer le transport de sable, on utilise les données des registres d'observation (tableau 13) de la station météorologique la plus proche. Pour avoir des données plus sûres, on analyse les phénomènes météorologiques pendant au moins 10 ans. Selon les données météorologiques de départ (tableau 13), on procède à l'échantillonnage des vents transportant du sable selon les directions et les vitesses. Il est préférable de procéder par mois.

On néglige les vents enregistrés aux températures inférieures à zéro après les précipitations et pendant les précipitations, puisque dans ces conditions, le transport de sable par le courant éolien n'a pas lieu.

La durée de chaque vent est tenue pour égale à 6 ou à 3 h, c'est-à-dire à l'intervalle entre deux observations successives.

Le relevé mensuel des vents transportant du sable permet de déterminer le transport du sable pour chaque mois, ce qui est très important, puisque ces données différenciées permettent, entre autre, de planifier les travaux de dessablage et de protection des ouvrages contre l'ensablement, etc.

Après une analyse minutieuse des conditions météorologiques de départ, on calcule le transport annuel ou mensuel de sable. Pour déterminer le transport de sable à probabilité fixée, il est nécessaire de procéder à des observations échelonnées sur plusieurs années.

Calcul du transport de sable par aires de vents ou secteurs d'horizon.
La formule:

$$G = 0,10 (V_g - 5,4)^3 t \quad (9)$$

donne la quantité de sable transporté G (g/m) pour la période d'action du vent t, où V_g est la vitesse du vent d'après la girouette de la station météorologique à la hauteur de 10 m.

Liste des données de départ pour le calcul mathématique des transports de sable

Date	Température de l'air, °C				Direction et vitesse du vent, m/s				Température de la surface du sol, °C			Épaisseur de la nappe nival, cm	Précipitations, mm	
	24 h		18 h		24 h		18 h		24 h		18 h		6 h	18 h
	24 h	6 h	12 h	18 h	24 h	6 h	12 h	18 h	24 h	6 h	12 h	18 h	6 h	18 h
1	-10,2	-10,5	-9,1	-11,0	E-6	E-7	SE-8	SE-8	-8,6	-10,0	-4,3	-9,4	-	-
2	-15,5	-14,8	-7,0	-9,1	SE-7	SE-8	SE-10	SE-8	-15,4	-13,4	-3,1	-10,3	-	-
3	-12,3	-13,7	-5,4	-8,1	SE-10	SE-10	SE-10	E-12	-11,3	-13,6	-2,3	-9,4	-	-
4	-10,3	-11,8	-4,8	-8,1	SE-12	SE-8	SE-16	SE-12	-12,2	-12,9	-2,3	-8,9	-	-
5	-9,9	-11,1	-2,1	-7,8	SE-12	SE-12	E-14	E-14	-11,4	-12,3	-0,8	-8,9	-	-
etc.														

Tableau 14

Débit de sable par seconde et par heure calculé
pour différentes vitesses du vent

Vitesse du vent, m/s	Débit de sable calculé d'après la formule:	
	$0,1(V_g - 5,4)^3$, g/m·s	$0,1(V_g - 5,4)^3$ 3600, kg/m·h
6	0,022	0,078
7	0,407	1,465
8	1,765	6,353
9	4,681	16,778
10	9,728	35,023
11	17,602	63,366
12	28,869	103,927
13	43,846	157,846
14	63,575	228,868
15	88,416	318,298
16	119,004	428,416
17	155,973	561,507
18	199,969	719,890
19	251,403	905,049
20	311,041	1119,746
21	379,412	1365,882
22	457,104	1645,574
23	$0,545 \cdot 10^3$	$1,961 \cdot 10^3$
24	$0,643 \cdot 10^3$	$2,315 \cdot 10^3$
25	$0,752 \cdot 10^3$	$2,315 \cdot 10^3$
26	$0,874 \cdot 10^3$	$3,145 \cdot 10^3$
27	$1,007 \cdot 10^3$	$3,626 \cdot 10^3$
28	$1,154 \cdot 10^3$	$4,153 \cdot 10^3$
29	$1,313 \cdot 10^3$	$4,729 \cdot 10^3$
30	$1,488 \cdot 10^3$	$6,036 \cdot 10^3$
31	$1,677 \cdot 10^3$	$6,036 \cdot 10^3$
32	$1,881 \cdot 10^3$	$6,771 \cdot 10^3$
33	$2,101 \cdot 10^3$	$7,564 \cdot 10^3$
34	$2,338 \cdot 10^3$	$8,416 \cdot 10^3$
35	$2,592 \cdot 10^3$	$9,330 \cdot 10^3$
36	$2,863 \cdot 10^3$	$10,308 \cdot 10^3$
37	$3,153 \cdot 10^3$	$11,352 \cdot 10^3$
38	$3,463 \cdot 10^3$	$12,465 \cdot 10^3$
39	$3,791 \cdot 10^3$	$13,647 \cdot 10^3$

Pour avoir le volume de sable transporté il faut diviser la formule (10) à la densité du sable ρ_M à l'état naturel.

Le débit de sable par seconde ou par heure, pour les vents de 6 à 39 m/s de vitesse, est tiré du tableau 14, ce qui simplifie les calculs.

Tableau 15

Liste d'estimation des transports de sable dans la zone de la station météorologique

(Mois) (Année)

Vitesse (V ^g) du vent, m/s	Direction du vent																Total
	N		NE		E		SE		S		SO		O		NO		
	Durée du vent t, h	Transport du sable G, m ³ /m	Durée du vent t, h	Transport du sable G, m ³ /m	Durée du vent t, h	Transport du sable G, m ³ /m	Durée du vent t, h	Transport du sable G, m ³ /m	Durée du vent t, h	Transport du sable G, m ³ /m	Durée du vent t, h	Transport du sable G, m ³ /m	Durée du vent t, h	Transport du sable G, m ³ /m	Durée du vent t, h	Transport du sable G, m ³ /m	
6	36	-	-	3	-	9	-	30	-	-	-	6	-	18	-	102/-	
7	0,0011	42	0,044	6	0,006	9	0,010	3	0,003	3	0,003	18	0,019	12	0,013	93/0,1	
8	0,0045	54	0,243	9	0,040	24	0,108	3	0,014	-	-	18	0,081	9	0,041	117/0,51	
9	0,0120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
10	0,0250	54	1,352	2	0,050	-	-	3	0,075	3	0,075	9	0,225	4	0,100	75/1,88	
11	0,0452	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
12	0,0739	33	2,440	6	0,444	-	-	-	-	-	-	3	0,222	-	-	42/3,10	
13	0,1129	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,677	-	-	6/0,68	
14	0,1636	6	0,982	-	-	-	-	3	0,491	-	-	3	0,491	-	-	12/1,96	
15	0,2275	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
16	0,3063	21	6,432	-	-	-	-	3	0,919	3	0,919	-	-	-	-	27/8,27	

En un mois (année)

246 11,49 8 0,49 18 0,05 42 0,12 45 1,50 9 1,00 63 1,71 43 0,15 474/16,51

Notes: 1. Dans le calcul du transport de sable, le coefficient de proportionnalité dans la formule (9), qui fait la conversion de la durée en heures, et de la masse du sable en kilogrammes pour $\rho_m = 1400 \text{ kg/m}^3$ est égal à $2,57 \cdot 10^{-4}$

2. Le numérateur dans la colonne «Total» indique la durée du vent, et le dénominateur, le transport total de sable (m^3/m).

Le transport mensuel (ou annuel G_t) de sable, selon une direction donnée, par des vents de toutes les vitesses V_{gi} , est égal à la somme des transports de sable par les vents de chaque vitesse G_{vi} , c'est-à-dire:

$$G_t = \sum_i^t G_{vi} . \quad (10)$$

Le transport de sable par vitesses et directions des vents transportant du sable peut être déterminé par l'intégration à table. Le tableau 15 présente la succession du calcul des transports de sable annuels par tous les vents pour 8 aires de vent. La verticale présente la vitesse des vents et l'horizontale, leur durée et les transports correspondants par aires de vent. En additionnant les transports de sable suivant la verticale, nous obtenons les transports mensuels (ou annuels) par directions. La somme des transports pour toutes les aires de vent est le transport total mensuel ou annuel pour une région donnée. Le volume de sable transporté calculé selon cette méthode correspond aux conditions d'un terrain de plaine ouverte.

Dans les calculs, la direction du transport est admise perpendiculaire au front du transport. Cependant, les vents ne forment pas toujours l'angle de 90° avec cette ligne. Ils sont généralement obliques et leur angle d'attaque est inférieur à l'angle droit. Dans ce cas (fig. 7), le transport de sable par unité de longueur d'une protection est plus faible que pour un vent perpendiculaire. Pour tenir compte de ce phénomène, il faut diminuer le transport de sable sous l'action d'un vent oblique par le sinus de l'angle d'attaque.

Avec un angle d'attaque a° , le débit de sable par unité de longueur est:

$$Q_1 = \frac{Ql}{l_1} = \frac{Ql}{l \operatorname{cosec} a} = Q \sin a \quad (11)$$

où l est la largeur du transport du sable;
 l_1 : la longueur de la zone de protection;
 Q : le débit de sable total.

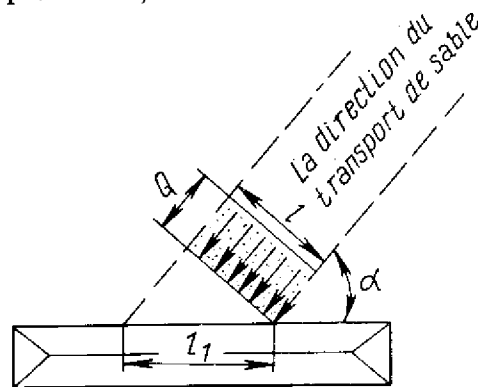


Fig. 7. Transfert de sable à travers une protection par un vent oblique

Le segment qui peut constituer le front d'ensablement ou de protection est considéré sur une petite distance, comme une ligne droite divisant le champ des directions du vent en deux parties, droite et gauche. Ces parties constituent les secteurs maxima des transports de sable, et chacun d'eux est égal à deux angles droits.

Admettons que les vents du secteur boréal attaquent une ligne de protection AB. Pour ces angles d'attaque (fig. 8), les transports de sable par aires de vent soient G_O , G_{NO} , G_N , G_{NE} (l'indexation correspond à la direction du vent). Alors le transport total de sable traversant la ligne AB sera:

$$R_o = G_O \sin a_1 + G_{NO} \sin a_2 + G_N \sin a_3 + G_{NE} \sin a_4 \quad (12)$$

c'est-à-dire que le transport annuel ou mensuel de sable pour chaque direction G_{cal} est multiplié par le sinus de l'angle correspondant. Compte tenu de cette correction, on détermine la quantité de sable apporté vers l'ouvrage $G_{préc.}$ (tableau 16).

Donc, la capacité de rétention de sable d'une protection établie sur la ligne NE - 90° (tableau 16) est égale à

$$R_o = 11,49 + (0,49 + 0,15) 0,707 = 11,95 \text{ m}^3/\text{m}.$$

Le transport total de sable obtenu est la résultante de tous les transports dans le secteur donné.

Tableau 16

Quantité de sable apporté vers l'objet

Côté de l'objet									
gauche					droit				
Directi- on du vent	Angle d'at- taque a_i	$\sin a$	$G_{cal.}$	$G_{préc.}$	Directi- on du vent	Angle d'atta- que a_i	$\sin a$	$G_{cal.}$	$G_{préc.}$
N	90	1	11,49	11,49	N	—	—	—	—
NE	45	0,707	0,49	0,350	NE	—	—	—	—
E	0	0	0,05	—	E	—	—	—	—
SE	—	—	—	—	SE	45	0,707	0,12	0,08
S	—	—	—	—	S	90	1	1,5	1,5
SO	—	—	—	—	SO	45	0,707	1,0	0,71
O	—	—	—	—	O	0	0	0	—
NO	45	0,707	0,15	0,11	NO	—	—	0,15	—
Total:				11,95	Total:				2,29

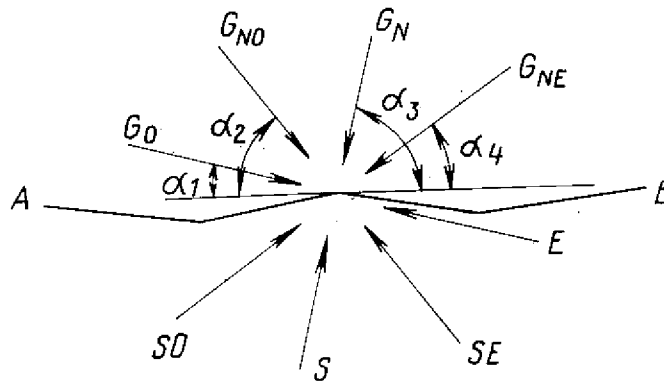


Fig. 8. Les angles d'attaque d'une ligne de protection par les vents du secteur boréal

Cette résultante peut être déterminée graphiquement. Pour cela, sur les vecteurs des transports voisins, on construit un parallélogramme identique à celui des forces. La diagonale du parallélogramme est la résultante absolue des transports de sable considérés.

Le total du transport de sable traversant une ligne donnée est égal à la projection de la résultante absolue sur la verticale à cette ligne, et est appelé la résultante relative du transport de sable traversant une ligne donnée (fig. 9).

S'il s'agit de déterminer la résultante des transports pour plusieurs secteurs, on la construit d'abord pour deux vecteurs, puis on y ajoute le troisième vecteur et construit la deuxième résultante pour y ajouter ensuite le quatrième vecteur, etc., jusqu'à ce que tous les vecteurs des transports initiaux s'expriment pour une résultante.

La méthode présentée montre que les données des observations météorologiques sont très importantes pour calculer les volumes de sable transporté.

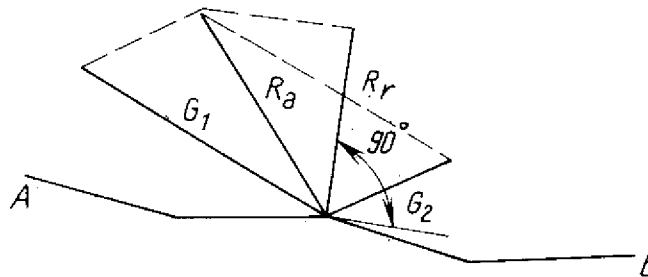


Fig. 9. Résultante absolue et relative du transport de sable

Les résultats des calculs analytiques du transport sont proches des volumes du transport obtenus par les observations et peuvent aider à trouver des solutions indicatives pour une série de problèmes appliquées, par exemple, à celui du choix de la variante du tracé d'une route ou d'une voie ferrée.

Caractéristiques statistiques des transports de sable. Le transport annuel de sable pour une direction est la somme (m^3) du sable transporté par le courant éolien au cours de l'année dans cette direction sur une bande de 1 m de largeur.

Le transport annuel du sable est:

$$G = \frac{0,10}{\rho_M} \sum_{k=1}^n \sum (V_g - 5,4)^3 t_k \quad (13)$$

où ρ_M est la densité du sable dans la région donnée.

Le transport annuel maximal de sable qu'il faut retenir est la quantité totale de sable (m^3) apportée par le courant éolien au cours de l'année, dans toutes les directions du vent, vers la ligne de protection, sur 1 m de largeur.

Le transport annuel maximal du sable est:

$$G = \frac{0,10}{\rho_M} \sum_{k=1}^n \sum (V_g - 5,4)^3 t_k \sin a \quad (14)$$

où a est l'angle formé par la direction du vent avec l'axe longitudinal de la protection.

La conception des mesures de prévention de l'ensablement calculées pour les transports maxima de sable observés dans une région donnée est un problème indéterminé, puisque le volume de sable transporté change d'une année à l'autre. Le maximum observé croît avec le nombre d'années d'observation, ce qui fait que les mesures techniques de prévention de l'ensablement doivent être conçues non pas sur la base du maximum observé du volume des transports de sable, mais sur la base du volume calculé pour une région donnée et justifié par des calculs techniques et économiques.

Le volume de sable déterminé par les données du régime éolien pour une année choisie au hasard peut être une valeur de probabilité différente de celle des données pérennes. Outre cela, pour les ouvrages de haute catégorie, la détermination du volume de sable apporté doit être plus fiable que pour les ouvrages des catégories inférieures. Aussi, le volume calculé du transport de sable est déterminé avec une probabilité imposée.

Le transport de sable de probabilité donnée est calculé sur la base des données d'au moins dix ans d'observation du régime éolien dépouillée par la méthode présentée ci-dessus. Dans le cas où la série des observations est relativement courte, la détermination du volume théorique du

transport de sable de probabilité donnée se fait par la loi de distribution de Student. Les données obtenues sont portées dans des bulletins, et l'on calcule la moyenne statistique du transport de sable G_m , ainsi que l'écart quadratique moyen pour chaque côté de l'ouvrage (tableau 17).

Tableau 17

Récapitulation du dépouillement de la série
des valeurs du transport de sable

Années d'obser- vation	Côté droit de l'objet			Côté gauche de l'objet		
	G_i	$G_i - G_m$	$(G_i - G_m)^2$	G_i	$G_i - G_m$	$(G_i - G_m)^2$
1	11,95	...	...	2,29	...	...
2, etc.	...	...	...	...	...	...
Somme totale	...	...	...	...	...	...

La moyenne statistique du transport de sable pendant la période des observations est:

$$G_m = \frac{\sum_{i=1}^n G_i}{n} \quad (15)$$

où n est le nombre d'années d'observations.

L'écart quadratique moyen pour chaque côté de l'ouvrage pour le nombre des membres de la série $n > 30$ sera:

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i - G_m)^2}{n}} \quad (16)$$

Le coefficient de variation est:

$$C_v = \frac{\sigma}{G_m} \quad (17)$$

L'erreur moyenne de la valeur statistique (%) sera:

$$E = \pm 100 \frac{C_v}{\sqrt{n}} \quad (18)$$

Ayant trouvé C_v et E , on vérifie, à l'aide du tableau 18, si la série choisie des transports de sable est suffisante pour le dépouillement des données.

Données vérifiant la suffisance de la série
des transports de sable pour le dépouillement

Coefficient de variation C_v	Nombre nécessaire d'années d'observation en fonction de l'erreur moyenne de la valeur statistique moyenne E, %							
	± 4	± 5	± 6	± 7	± 8	± 9	± 10	± 20
0,15	14	9	6	5	4	3	2	1
0,20	25	16	11	8	6	5	4	1
0,25	39	25	17	13	10	8	6	2
0,30	56	36	25	19	14	11	9	2
0,35	76	49	33	25	19	15	12	3
0,40	100	64	44	33	25	20	16	4
0,45	126	81	55	42	32	25	20	5
0,50	156	100	69	50	39	31	25	6
0,55	189	121	83	62	47	38	30	8
0,60	225	144	99	74	56	45	36	9

Le transport théorique de sable de probabilité donnée:

$$G_{cal} = G_m + \sigma \cdot \tau \quad (19)$$

où τ est l'écart normé pour la distribution de Student déterminé en fonction de la probabilité de l'excès et de la série des observations (tableau 19).

Les roses du transport de sable. La météorologie appliquée ne connaissait, encore tout récemment, que la notion de rose des vents exprimant la fréquence de ceux-ci selon les points cardinaux de l'horizon. Cette rose des vents ne caractérise pas les paramètres dynamiques du courant éolien, c'est pourquoi son application à la solution des problèmes techniques est limitée. Elle ne permet que de déterminer la durée de la diffusion, selon les aires de vent, des polluants atmosphériques, en particulier de la fumée des usines. Les tentatives d'utiliser les roses des vents pour orienter rationnellement les moyens de protection des ouvrages contre l'ensablement n'ont pas donné l'effet attendu, puisque la fréquence des vents et le transport de sable ne sont pas proportionnels.

Pour la prévention efficace de l'ensablement, il est nécessaire de connaître de quel point de l'horizon et en quelle quantité le sable arrive vers les ouvrages exposés à l'ensablement.

On ne peut étudier les moyens de protection que sur la base de ces données. C'est à ces fins qu'a été introduite la notion de **rose des transports de sable**.

Tableau 19

Ecart normés de la distribution de Student

n-1	Probabilité de l'excès, %	
	5	10
1	12,7	6,31
2	4,3	2,92
3	3,18	2,35
4	2,78	2,13
5	2,57	2,02
6	2,45	1,94
7	2,36	1,90
8	2,31	1,86
9	2,26	1,83
10	2,23	1,81
11	2,20	1,80
12	2,18	1,78
13	2,16	1,77
14	2,14	1,76
15	2,13	1,75
16	2,12	1,74

La rose des transports de sable pour une année ou un mois est construite sur la base des données du tableau 15. Pour cela, on porte (à une échelle), suivant les points cardinaux de l'horizon et partant d'un point d'origine, les volumes totaux des transports de sable (m^3/m) qui leur correspondent et qui sont indiqués par mois (ou par an) en ligne horizontale, au bas du tableau 15. En reliant les points obtenus, on forme un polygone rappelant par sa forme une rose. La rose est munie d'une notice explicative qui contient les caractéristiques numériques, le rattachement du transport de sable au lieu et au temps, l'identification de la station météorologique qui a fourni les données, la date, l'année ou le mois, ainsi que les volumes de transports de sable par aires de vent (m^3/m). La notice d'une rose peut montrer, par exemple, que le transport de sable maximal suivait la direction N, et le transport minimal la direction E (fig. 10). La direction du transport est admise vers le centre de la rose.

Il est évident que les moyens de protection des ouvrages ne peuvent être conçus pour les transports de sable d'une année choisie au hasard. Ces données peuvent être soit très faibles, si elles correspondent à une année à faible transport de sable, soit très fortes, si l'année est caractérisée par un important transport.

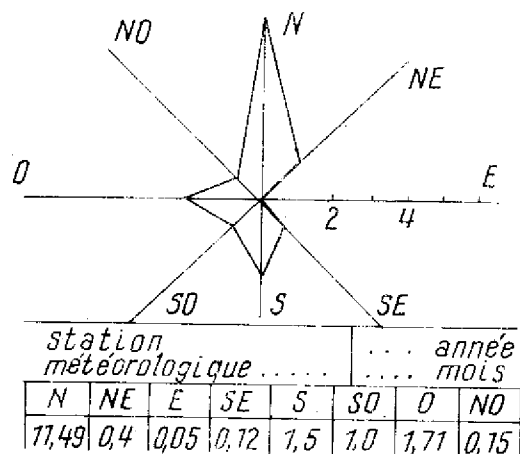


Fig. 10. Rose des transports de sable

Les moyens de protection des ouvrages contre l'ensablement et leur disposition sur le plan doivent correspondre à la **rose théorique des transports de sable**. La rose théorique est celle qui reflète les transports de sable de probabilité donnée pour toutes les aires de vent. La notice d'une rose théorique du transport de sable indique la station météorologique qui a fourni les données pour la construction de la rose, ainsi que les années d'observations prises en compte.

Une rose théorique donne une idée nette des quantités et des directions de migration du sable dans le courant éolien. Pour la solution des problèmes pratiques et, avant tout, pour la conception rationnelle des moyens de protection, il est nécessaire de connaître justement ces paramètres initiaux du courant éolien.

Si l'on appose sur le plan du terrain exposé à l'ensablement la rose théorique des transports de sable, il est facile de déterminer pour chaque côté la résultante des transports pour laquelle il est nécessaire de calculer les paramètres des moyens de protection (nombre de rangées, hauteur, etc.). On rattache la rose au plan de l'ouvrage par quarts géodésiques. Le quart géodésique est compté à partir du pôle le plus proche, et mesuré de 0 à 90°. Donc, du côté nord, les quarts géodésiques peuvent être nord-est ou nord-ouest, et du côté sud, sud-est et sud-ouest.

Par exemple, pour rattacher la rose des transports de sable au côté de l'ouvrage en direction 50° nord-est, on fait coïncider le centre de la rose avec un point quelconque du côté face de l'ouvrage. Ensuite, on fait tourner la rose autour du centre jusqu'à ce que l'angle entre la direction nord de la rose (pôle nord) et la direction du segment donné suivant le méridien n'est égale à 50° (fig. 11). De manière identique on rattache la rose aux autres côtés de l'objet.

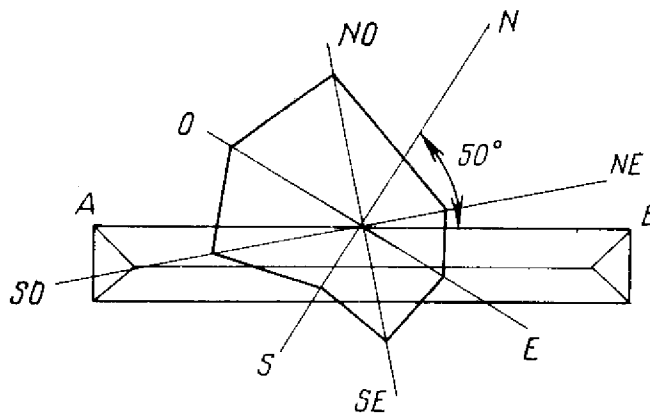


Fig. 11. Calage de la rose du transport de sable au plan de l'ouvrage

On se sert de la rose des transports de sable pour le choix des protections contre l'ensablement non seulement des ouvrages linéaires, mais aussi des ouvrages étendus, dont les agglomérations, qui, se trouvant dans une région ouverte exposée à l'ensablement et non protégées suivant le contour, sont envahies par le sable dans toutes les directions.

Le volume total de sable apporté pendant un an (ou un mois) sur le territoire de l'ouvrage est calculé, à l'aide de la rose des transports de sable, par la formule:

$$G = G_1 l_1 + G_2 l_2 + \dots + G_n l_n \quad (20)$$

où G_i représente les transports de sable par an ou par mois, selon l'aire de vent correspondante de la rose, m^3/m ($i = 1. . n$);

l_i est la projection linéaire du contour du territoire de l'ouvrage sur une droite perpendiculaire à l'aire de vent correspondante de la rose.

3.3. ETUDE DE LA DYNAMIQUE DU REGIME DES EAUX

L'étude du régime des eaux des horizons végétaux est une condition sine qua non pour caractériser les conditions d'habitat des sables mouvants et pour sélectionner judicieusement les plantes fixatrices de sable.

Le régime des eaux doit être étudié suivant certaines règles [Rodé, 1969]: 1. L'humidité dans les horizons végétaux est déterminée sur toute l'épaisseur, puisque le sol, dans sa structure verticale, est, en règle générale, hétérogène quant à sa granulométrie, composition chimique et structure. Cette hétérogénéité conditionne l'inégalité d'accumulation et de dépenses d'humidité dans des couches différentes.

Les observations se font durant des périodes où les variations de l'humidité dans le temps sont apparentes.

Les études sont faites en plusieurs surfaces afin d'obtenir des résultats plus fiables. Le régime des eaux est généralement étudié par couche de sol, tous les 10 cm; l'humidité est mesurée mensuellement à trois ou quatre reprises.

Il existe à l'heure actuelle deux façons essentiellement différentes de déterminer l'humidité du sol: la première consiste à prélever des échantillons de terre, la seconde, à mesurer l'humidité sur le terrain, sans prélèvement.

La première méthode prévoit le forage ou le prélèvement d'échantillons dans des fouilles préalablement aménagées. Une partie des échantillons sont placés dans des bocaux à couvercle étanche. Les bocaux remplis de terre humide sont pesés sur une balance avec une précision de 0,01 g, après quoi les échantillons, se trouvant toujours dans les récipients, sont séchés dans un thermostat à une température de 100 à 105 °C jusqu'à la stabilisation du poids (l'humidité s'évapore complètement au bout de 6 h de séchage). Le bocal est de nouveau pesé. La différence de poids entre un même récipient contenant de la terre humide et sèche donne l'humidité contenue dans l'échantillon en grammes. Le pourcentage de teneur en eau est calculé par rapport au sol relativement sec d'après la formule:

$$\frac{P_1 - P_2}{P_2 - P_0} \cdot 100 \quad (21)$$

où P_1 est le poids du bocal avec du sol humide,

P_2 : le poids du bocal avec du sol sec,

P_0 : le poids du bocal.

En procédant aux recherches par la méthode de pesage, il est commode de récapituler toutes les notes prises en situ ou en laboratoire dans un registre spécial présenté comme suit (tableau 20).

Tableau 20

Humidité du sable dans le massif sableux de Kara-Koum
au 12 février 1980. Dépression interdunaire

Profondeur du prélèvement de l'échantillon, cm	N° du bocal	Poids du bocal vide, g	Poids du bocal -sol humide, g	Poids du bocal -sol sec, g	Poids de l'humidité, g	Poids du sol sec, g	Humidité du sol, %	Remarques
0 à 10	1	21,50	67,85	65,92	1,93	44,42	4,34	La végétation fait défaut
10 à 20	2	20,83	74,53	72,33	2,20	51,50	4,27	
20 à 30	3	22,14	70,31	68,81	1,50	46,67	3,23	

La détermination de l'humidité du sol sur le terrain, sans prélèvement d'échantillons est basée sur diverses propriétés physiques de la solution contenue dans le sol. Il a été mis au point quatre méthodes essentiellement différentes de détermination de l'humidité dans les sols: 1) tensiométrique — selon la pression de succion; 2) électrométrique — selon la conductivité électrique, la capacité électrique des sols, etc.; 3) la méthode des thermosondes enregistrant la conductivité calorifique des sols; 4) les méthodes radioactives utilisant la radiographie aux rayons gamma ou les traceurs neutroniques [Koulik, 1979]. Ces techniques n'ont pas trouvé de large diffusion, car pour une humidité faible, ce qui est le cas des sables de barkhanes, les résultats des observations montrent d'importants écarts.

Ce sont les tableaux récapitulatifs qui donnent la première idée de l'humidité des sols. Les données relatives à l'humidité du sol peuvent y figurer en pourcentage par rapport au poids sec, et sous forme de réserves d'eau en millimètres de colonne d'eau (tableau 21).

Tableau 21

Evolution annuelle de l'humidité dans les dépressions interdunaires du massif du Kara-Koum

Profondeur de la couche, cm	Dates							
	10.1		12.2		9.3		10.4	etc.
	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm
0 à 10	4,34	6,51	4,01	6,01	3,97	5,95		
10 à 20	4,22	6,40	3,75	5,62	3,85	5,77		
20 à 30	3,23	4,84	3,04	4,56	3,00	4,50		
et ainsi de suite.								

Les réserves d'humidité en millimètres de colonne d'eau par hectare sont calculées d'après la formule:

$$R_h = H_r \cdot \frac{P_v \cdot h}{10} \quad (22)$$

où R_h est la réserve d'humidité en un mm de couche du sol;

H_r : l'humidité de la couche en % du poids du sol sec;

P_v : le poids volumique en g/cm^3 de la couche étudiée;

h : l'épaisseur de la couche étudiée.

Pour déterminer la quantité d'humidité dans une couche de 10 cm d'épaisseur, la formule est:

$$R_h = H_r \cdot P_v \quad (23)$$

Dans les massifs sableux du Kara-Koum, le poids volumique des sables varie de 1,37 à 1,67 g/cm³. Dans le tableau 21 le volumique de 1,50 g/cm³ est admis pour tous les horizons. L'humidité du sol dans la couche étudiée peut également être représentée graphiquement. Les chrono-isoplèthes de l'humidité sont de loin les plus expressives. Cette méthode permet de caractériser les fluctuations de l'humidité dans la couche étudiée pour toute période d'observation quelle qu'en soit la durée.

En même temps, les graphiques révéleront la pluviométrie, les variations de la température de l'air et des horizons supérieurs du sol, l'humidité relative de l'air, et d'autres facteurs climatiques.

La représentation graphique de l'humidité des sols se fait dans un référentiel orthogonal. D'abord, on marque le temps sur l'axe des abscisses (mois, an), et la profondeur des horizons qui font l'objet d'observations périodiques de l'humidité sur l'axe des ordonnées (fig. 12a). Ensuite, pour chaque date d'observation, sur l'ordonnée qui lui correspond, on porte les valeurs de l'humidité du sol en pour-cent par rapport à son poids sec (fig. 12b). Puis, par interpolation, on trouve les points avec les valeurs intermédiaires de l'humidité (sur les graphiques, cela se fait par paliers de 0,5 de 1 ou de 2 %). Pour les sols sableux, on choisit généralement les paliers d'humidité de 0,5 %. Les points de même humidité sont reliés par des courbes qui sont les chrono-isoplèthes de l'humidité (fig. 12c). Les espacements entre les lignes voisines représentent la couche du sol dont l'humidité correspond à une valeur donnée. Suivant les saisons, les couches changent de position dans l'assise du sol jusqu'à disparaître parfois tout à fait pour un temps [Rodé, 1969].

Pour déceler les voies principales par lesquelles l'eau parvient dans le sol et s'en échappe, l'on prendra soin d'établir le bilan hydrique. L'équation ci-dessous aidera à définir le bilan hydrique total:

$$R_f - R_i = (P + VPh + VES + IS + C) - (E + D + PPh + PES + PII), \quad (24)$$

où R_i est la réserve d'humidité initiale dans le sol;

R_f : la réserve d'humidité finale dans le sol;

P: la pluviométrie totale atteignant la surface du sol;

VPh: le volume de la venue d'eau dans le sol en provenance de la nappe phréatique;

VES: l'écoulement superficiel alimentant en eau le terrain donné;

IS: le volume de l'infiltration affluente dans le sol;

C: la quantité de vapeurs d'eau venant de l'atmosphère et se condensant dans le sol;

D: le volume de dessiccation de l'eau du sol par la végétation;

E: le volume de l'évaporation physique de l'humidité du sol;

PPh: le volume de l'infiltration affluente vers les eaux souterraines;

PES: les pertes d'humidité par écoulement superficiel;

PII: les pertes d'humidité vers d'autres secteurs du sol.

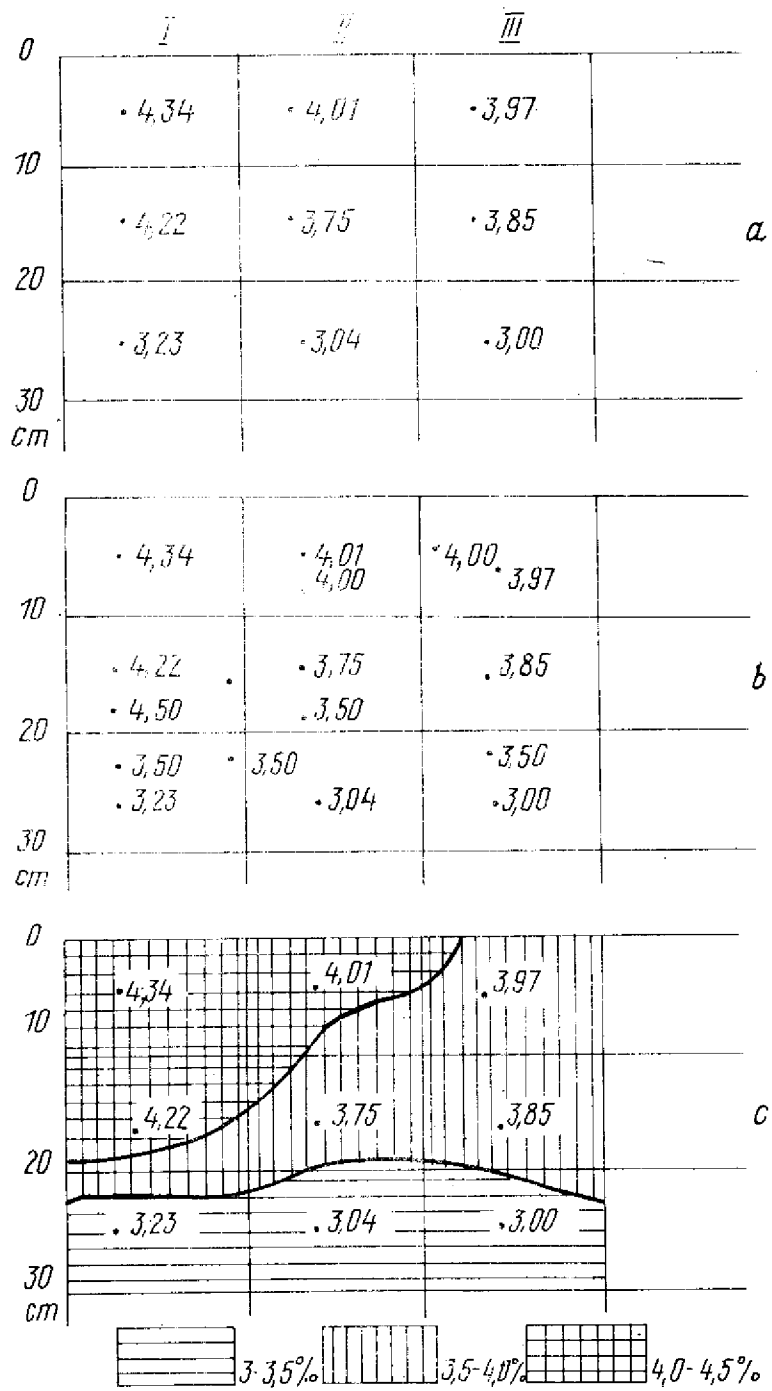


Fig. 12. Les chronoisoplètes de l'humidité

La partie crédit d'un bilan hydrique se compose des précipitations, des venues d'eau par écoulement superficiel, de l'infiltration affluente du fait du transfert de vapeurs d'eau dû au gradient thermique, de l'eau venue de la nappe souterraine de la condensation de la vapeur atmosphérique; la partie débit d'un bilan est constituée par l'évaporation et la transpiration, les pertes par écoulement superficiel et intérieur, le reflux de l'humidité du sol vers les eaux souterraines.

Nombres de recherches expérimentales et d'essais in situ attestent [Koulik, 1979] que certains éléments du bilan hydrique peuvent être exclus comme insignifiants. Il s'agit des venues par migration intérieure, de l'eau qui parvient dans le sol en provenance de la nappe et, pour les sables, des venues et des pertes par écoulement superficiel. Pour ce qui est des sables de barkhanes la dessucion de l'eau sera même exclue. Il importe en même temps de prendre en compte les précipitations linéaires en tant qu'élément corrigeant la venue de l'eau atmosphérique.

Ainsi, après une révision correspondante de l'équation principale, les calculs du bilan hydrique pour les sables en mouvement doivent être effectués d'après la formule suivante:

$$R_f - R_i = (P_v + P_h + C) - (E + PPh) \quad (25)$$

où R_i est la réserve d'humidité initiale;

R_f : la réserve d'humidité finale;

P_v : les précipitations verticales (pluie, neige);

P_h : les précipitations horizontales ou hydrométéores (brouillard, givre, gelée blanche, rosée);

C : les condensations atmosphériques à la surface du sable;

E : l'évaporation physique de la surface du sable;

PPh : le ruissellement gravitaire en nappe vers les eaux phréatiques.

Les stations météorologiques les plus proches fournissent les valeurs des précipitations verticales pour la durée des observations.

L'humidité provenant des hydrométéores est calculée en multipliant le nombre de jours avec hydrométéores, selon les données des stations météorologiques pour la période des observations, par 0,2 mm (on estime qu'un cas de tel phénomène assure l'arrivée dans le sol d'environ 0,2 mm d'humidité) [Koulik, 1979].

La valeur de la condensation de l'eau est calculée au moyen de condensomètres. Ces derniers se présentent sous forme de godets de terre placés dans des frettes en papier huilé. Les condensomètres sont remplis de sable dont la teneur en eau avoisine HM et sont placés dans le sable. Ils sont pesés au lever et au coucher du soleil. Ensuite la valeur absolue de la condensation est traduite en mm de colonne d'eau. La conversion se fait en divisant la valeur de l'humidité par la surface réceptrice du godet.

La condensation peut aussi être calculée selon la méthode du bilan thermique [Kouvchinova, 1963]. L'évaporation physique totale de la surface du sol est établie d'après les formules empiriques proposées par N. Koulik (1979).

Pour les sables mouvants dénudés:

a) en mars et novembre

$$E = P_3 + 2N_3 + 0,2 (N_{sp} - N_3); \quad (26)$$

b) en avril — octobre

$$E = P_3 + 3N_3 + 0,3 N_{sp} \quad (27)$$

où E est l'évaporation physique en mm de colonne d'eau;

P_3 représente les précipitations égales ou inférieures à 3 mm;

N_3 , le nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 3 mm et N_{sp} , le nombre de jours sans précipitations.

Le ruissellement gravitaire en nappe est calculé selon la méthode de N. Koulik (1979). Le ruissellement est fonction de la vitesse de l'écoulement (tableau 22), du temps (heures) et de la teneur du sol en eau à la limite inférieure de la couche étudiée.

Il est commode de présenter les calculs du bilan hydrique sous forme de tableaux (tableau 23).

Tableau 22

Vitesse de l'écoulement gravitaire
verticale dans les sables pulvérulents
et à grains fins
[Koulik, 1979]

Teneur en eau, %	Vitesse de l'écoulement, mm/h, de la colonne d'eau dans les conditions naturelles
10	46
8	10
7	2,5
6	0,1
5,5	0,04
5	0,02
4,5	0,01
4,0	0,005
3,5	0,003
3,0	0,002
2,5	0,001
2,0	0,0006
1,5	0,0003
1,0	0,0001
0,9	0,0001
0,4	0

A titre d'exemple, nous citerons les calculs qui ont porté sur les sables de barkhanes d'une épaisseur de 3,5 m situés dans le Bas Kara-Koum. Il a été enregistré, durant la période des recherches s'étalant d'octobre 1964 à septembre 1965, 81,8 mm de précipitations dans la saison froide et 64,7 mm dans la saison chaude; 98 cas d'hydrométéores (brouillard, givre, gelée blanche, rosée) qui devaient augmenter l'humidité en saison froide et chaude de 16,4 et 3,1 mm respectivement. L'humidité de condensation c'est-à-dire l'humidité venue au sol à la suite d'une absorption moléculaire des vapeurs d'eau, a assuré un supplément d'humidité s'élevant respectivement à 3,83 et 19,92 mm en saison froide et chaude.

L'évaporation physique et le ruissellement gravitaire en saison froide et chaude ont atteint, respectivement, 8,0, 40,45 et 80,40; 46,89 mm.

3.4. ETUDES PEDOLOGIQUES DANS LE CADRE DE LA PHYTOAMELIORATION DES TERRES

L'aptitude des sols à la sylviculture dépend d'une série de facteurs: granulométrie, degré et nature de la salinité, particularités physico-chimiques, présence d'éléments nutritifs assimilables, etc. Cependant, avant de procéder à l'examen du profil du sol, il convient de décrire les facteurs naturels qui sont en rapport génétique direct avec le type du sol donné. Les facteurs essentiels qui influent directement sur la formation et l'évolution des sols sont les suivants:

1. Caractéristique géomorphologique du territoire.
2. Géologie: roches de base et pédogènes.
3. Conditions hydrogéologiques.
4. Végétation en tant que facteur pédogénétique.
5. Rôle des animaux dans les processus pédogénétiques.

Chacun des facteurs énumérés ci-dessus fait l'objet d'étude par l'analyse des publications et les observations sur le terrain. Les données ainsi recueillies sont récapitulées dans un registre spécial et seront ultérieurement précisées et complétées si besoin est.

Après avoir étudié les facteurs pédogénétiques, on commence à aménager une fouille pédologique. Généralement, la fouille est profonde de deux mètres, mais cette profondeur peut être beaucoup plus grande suivant les objectifs. Pour prélever des échantillons de sol pour les analyses chimiques et autres, on recourt le plus souvent, à une profondeur de plus de deux mètres, aux sondes à cuillère.

Le profil est aménagé de façon à ce que sa paroi verticale, qui sera l'objet d'une description morphologique, soit entièrement éclairée. Ensuite, l'on se sert d'un ruban gradué pour mettre en évidence les horizons, et on procède à leur description dans le sens ascendant.

Voici un exemple de la description d'un sol typique, sablonneux, désertique de Kara-Koum central, suivant un profil pratiqué dans les sables mamelonnés d'une fosse interdunaire.

0 à 3 cm — sable gris foncé, grain fin à très fin, meuble, sec, sans inclusions; transition apparente par la structure.

3 à 14 cm — horizon gazonné, grisâtre, humide, compacté par les racines; transition nettement prononcée (couleur, structure, accumulation de racines).

14 à 23 cm — gris jaunâtre, densité moyenne, ponctué de racines de Carex physodes, de galeries d'insectes, peu humidifié (frais); transition nette quant à la structure et à la couleur (plus foncée).

23 à 45 cm — horizon de transition, jaune grisâtre, humide, légèrement compact, homogène, grain très fin; transition graduelle.

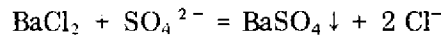
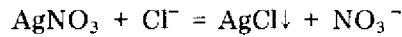
45 à 75 cm et plus — roche pédogène, sable jaunâtre grisâtre, homogène, à grain fin, humide, quelques racines vivantes et restes de racines en décomposition.

260 à 270 cm — passage à la roche de base, apparition de couches intermédiaires et traces de sable micacé gris clair, humide, peu compacté; dans la partie inférieure le sable jaune fait pratiquement défaut; transition progressive.

270 cm et plus — dépôts de base de sable micacé gris, humide, ferruginosité sporadique, inclusions de gypse, d'oxydes de fer. La description du profil en question a eu lieu fin mars (24 mars). C'est la raison pour laquelle la quasi-totalité du profil contenait de l'humidité due aux abondantes précipitations enregistrées en cette saison.

Des descriptions de profils du sol effectuées en d'autres saisons de l'année feront, évidemment, état d'indices d'humidité différents, jusqu'à la sécheresse totale. Aussi est-il indispensable de ne jamais perdre de vue la profondeur d'infiltration de l'eau.

A l'étude des propriétés morphologiques de sol succède l'examen de la teneur des horizons en sels et carbonates. Pour déterminer la salinité sur le terrain, il faut disposer d'un jeu d'éprouvettes et de deux solutions de réactifs, à savoir: de l'azotate d'argent (AgNO_3) et du chlorure de baryum (BaCl_2), ainsi que de l'eau distillée. La présence de sels est déterminée de la manière suivante. On prélève dans deux éprouvettes un peu de sol de chaque horizon, on y verse de l'eau distillée, on agite le tout et on laisse décanter. Ensuite on verse le liquide dans des éprouvettes propres en ajoutant AgNO_3 dans l'une et BaCl_2 dans l'autre. Dans le cas où le sol contient des chlorures et des sulfates, la substance dans les éprouvettes devient trouble par suite des réactions suivantes:



L'intensité de la précipitation permet de juger de la salinité.

Les sols salins se subdivisent en groupes:

Catégories de sols:	Profondeurs des horizons salins, cm
1. Salins	au-delà de 150
2. Très salins	100 à 150
3. Très salifères	70 à 100
4. Salifères	30 à 70
5. Solontchaks	5 à 30

Le degré de salinité des sols, qui est fonction de la teneur en sels, est déterminé d'après les analyses de laboratoire. On distingue les degrés:

	Quantité de sels (précipité sec), %
1. Faible	0,25 à 0,50
2. Moyen	0,5 à 0,7
3. Important	plus de 0,7

Une solution à 10 % d'acide chlorhydrique permettra de déceler des carbonates dans le sol. Une goutte d'acide chlorhydrique provoquera, s'il y a lieu, des bulles gazeuses (chuintement).

L'intensité du dégagement de gaz est plus ou moins révélatrice du degré de saturation en carbonates.

La teneur des sols en solontchaks constitue, comme chacun le sait, une des propriétés les plus nuisibles. Le classement des sols par leur teneur en solontchaks sur le terrain se fonde tant sur l'étude de caractères morphologiques (couleur brunâtre, forte compacité à l'état sec, fissuration, tendance à devenir mouvante étant humide, etc.), que sur la réaction qualitative. La réaction la plus simple est celle de l'extrait aqueux sur la phénolphthaléine (coloration en rose).

La présence de gypse dans le profil est détectée visuellement au moyen d'un verre grossissant. Les inclusions de ce minéral se reconnaissent par une structure cristalline, drusillaire ou se présentent sous forme de poches de matière pulvérulente (néo-formations).

L'étude des propriétés hydro-physiques nécessite, en règle générale, de considérables efforts et se limite à l'essentiel. Pour cela, il y a intérêt de choisir soigneusement le terrain d'essais. L'objet de l'étude doit refléter au maximum les caractères typiques de la région étudiée.

Il existe plusieurs façons de décrire les particularités hydrophysiques suivant les objectifs à atteindre par les investigations pédologiques, mais le plus souvent on retient sur le terrain les données suivantes sur le sols:

1. Poids spécifique apparent.
2. Capacité pour l'eau au champs (minimale).
3. Perméabilité (vitesse de filtration verticale).
4. Coefficient de filtration horizontale.

5. Hauteur de montée capillaire.
6. Profondeur critique des eaux phréatiques.

Outre les essais sur le terrain, on détermine en laboratoire:

1. Le poids spécifique réel (pour la détermination de porosité).
2. L'hygroscopicité maximale.
3. Le point de flétrissement.

Il existe un procédé analytique courant pour chacune des caractéristiques mentionnées.

Parallèlement à la description du profil, on procède au prélèvement d'échantillons qui seront analysés au laboratoire. L'échantillonnage se fait dans les horizons génétiques de bas en haut sur toute l'épaisseur de ces derniers pour obtenir une moyenne.

Méthodes de détermination des principales propriétés physiques et hydrauliques des sols

I. Poids spécifique apparent.

Le poids spécifique apparent est calculé directement sur le terrain, dans les fouilles. Pour cela, on utilise des cylindres métalliques à bord tranchant. Le diamètre du cylindre est de 3 à 5 cm, la hauteur de 4 à 8 cm.

L'analyse:

1) On enfonce avec précaution le cylindre dans l'horizon, en prenant soin de ne pas perturber sa structure.

2) On ressort le cylindre qui sera nettoyé, puis on enlève le trop-plein de terre à ras des bords du cylindre. Le contenu du cylindre sera placé dans un récipient affecté à cet usage et pesé.

3) Le contenu du récipient est séché jusqu'au poids constant.

Le poids spécifique apparent est calculé d'après la formule:

$$d = \frac{A}{V} \quad (28)$$

où d est le poids spécifique apparent (g/cm^3);

A: le poids du sol absolument sec (g);

V: le volume du cylindre (cm^3).

II. Détermination de perméabilité par ennoyage de parcelles.

Opérations:

1) Sur un terrain typique du point de vue pédologique, on enfonce un cadre métallique de 25×25 cm à une profondeur de 5 à 10 cm. Un second cadre de 50×50 cm est enfoncé autour du premier à la même profondeur. On tasse le sol près des parois, et on installe à l'intérieur de chaque cadre une règle graduée indiquant le niveau d'eau.

2) Au début de l'expérience, on verse, à l'aide de cylindres de mesure, de l'eau dans les deux cadres en maintenant le niveau à la hauteur de 5 cm.

3) La dépense de l'eau est contrôlée toutes les 2, 3, 5 ou 10 mn. A mesure que la dépense diminue, les intervalles augmentent jusqu'à 30 mn et 1 h. L'expérience en question dure de 3 à 6 h selon les particularités du sol.

4) La perméabilité est déterminée, pour chaque intervalle de temps, d'après la formule:

$$V = \frac{Q \cdot 10}{S \cdot t} \quad (29)$$

où Q représente la dépense de l'eau (cm³);

S: la surface de la colonne filtrante (cm²);

t: la durée de l'expérience (mn);

V: la vitesse d'absorption et de filtration (cm/mn).

Les résultats obtenus, à différentes températures de l'eau V_t sont réduits à 10 °C d'après la formule de Hasen:

$$V_{10} = \frac{V_t}{0,7 + 0,03 t^{0,5}} \quad (30)$$

à la suite de quoi l'on établit un diagramme. Les observations sont renouvelées deux ou trois fois.

3.5. TECHNIQUES DE FIXATION DES SURFACES SABLEUSES

Le développement et la préservation des plantes cultivées sur les sables de barkhanes sont en rapport direct avec les processus de déflations. L'accumulation comme la dispersion du sable sont préjudiciables à la végétation. La déflation dans les barkhanes peut être prévenue au moyen de protections mécaniques ou par l'application de substances chimiques liantes sur la surface.

Les protections mécaniques étaient appliquées en Asie Moyenne depuis très longtemps. Les spécialistes soviétiques en la matière ont mis au point nombre de protections mécaniques de différents types qui sont largement utilisées dans toutes les régions désertiques de l'Union Soviétique pour combattre l'ensablement.

Les protections mécaniques verticales sont mises en place de la façon suivante: on creuse une tranchée à la profondeur de 20 cm suivant un tracé marqué au préalable. Après cela, le matériau de protection est appliqué contre une des parois, soulevé verticalement, fixé par le sable, qui est ensuite tassé.

Les rangées de protection sont disposées perpendiculairement aux vents dominants.

Quand aux protections verticales à jour (0,3 — 0,7 m) ou semi-dissimulées, elles sont assurées par des matériaux d'origine végétale de dimensions variées.

Un système de protections verticales à jour ou semi-dissimulées est composé de rangées principales, installées perpendiculairement aux vents dominants et transversaux. Les dimensions des enceintes peuvent être de 2×2, 3×3 et 4×4 m.

Les protections linéaires recouvrantes sont constituées de matériau végétal, épais de 5 à 7 cm, disposé en travers de la rangée. Les protections sont fixées par le sable dont le milieu des rangées est chargé à cet effet.

Les protections recouvrantes longitudinales sont généralement faites de plantes à tiges droites (rouseau, massette) qui garnissent le sol sur 25 cm de largeur et 10 à 15 cm d'épaisseur. En disposant le matériau végétal le long de la ligne de protection on veillera à ce que les faisceaux de tiges se recouvrent. Les joints devront être fixés par le sable. Des piquets installés tous les 4 à 5 m par paires (un piquet de part et d'autre) assurent la stabilité des protections longitudinales.

Les protections mécaniques sont mises en place manuellement dans les sables dunaires depuis novembre jusqu'à fin janvier. Cette période serait la plus propice à l'opération, car vers le moment des semailles ou de la plantation, la barkhane munie de protections mécaniques aura un profil stable excluant l'ensablement excessif ou la déflation des graines ou des boutures. En plus, l'humidité du substrat en cette saison facilite sensiblement l'implantation des protections.

Les protections recouvrantes peuvent être installées en toute saison, mais c'est la période précédant les semailles qui serait la plus indiquée. Installées trop précocément, elles sont inaptes à retenir la semence, étant elles-mêmes ensablées au moment de l'ensemencement.

Les distances optimales entre les rangées de protections mécaniques sont les suivantes (tableau 24).

Tableau 24

Espacement entre les rangées de protections mécaniques hautes de 30 cm (en mètres) (d'après A. Stépanov, 1963)

Vitesse du vent, m/s	Espacements entre les rangées pour les pentes de		
	5°	10°	15°
jusqu'à 17 ou 18	4,2	3,0	2,1
plus de 18	3,3	2,1	1,2
	Protections recouvrantes		
jusqu'à 17 ou 18	4	3	2
plus de 18	3	2	1

Il convient d'installer les protections mécaniques, quelle qu'en soit la nature, au bas de pentes au vent des chaînes de barkhanes, qui offrent des conditions végétales favorables et où ces protections sont moins exposées aux effets destructifs des vents. L'on peut aussi installer les protections mécaniques sur toute la surface.

Les protections mécaniques ont d'autres propriétés amélioratives: elles concourent à conserver l'humidité du sable et à diminuer l'échauffement des horizons superficiels.

Rien que de 1945 à 1965, l'utilisation de protections mécaniques en Turkménistan et Ouzbékistan a permis de fixer et de boiser quelques 640 mille hectares. Durant ces dernières années (1968 — 1978) 180 mille hectares sont venus s'y ajouter [Pétrov, 1977].

Le danger d'ensablement des oasis, localités, ouvrages industriels, installations d'irrigation, voies ferrées et routes a été totalement écarté.

La dernière décennie voit s'intensifier les efforts de recherches visant à mécaniser les travaux de fixation et de boisement des sables de barkhanes en U.R.S.S. On peut d'ores et déjà constater certains succès remportés dans ce domaine. La mécanisation des travaux de fixation des sables s'est avérée possible grâce à l'utilisation d'agents chimiques susceptibles de former sur la surface sableuse des croûtes élastiques ou rigides. Comme substances liantes on préconise l'emploi du pétrole brut, du nérozine, des polymères de la série K, des latex, des huiles usées, des résines, etc.

La résistance mécanique et la tenue à l'érosion éolienne des croûtes sableuses, obtenues au moyen de divers agents liants, dépend, avant toute chose, de leur dosage et de leur application régulière sur la surface à traiter, autrement dit du procédé technologique.

Il est démontré par la pratique que la pulvérisation des liants sur la surface sableuse est le procédé le plus approprié. La pulvérisation se fait à l'aide de mécanismes assurant une répartition assez régulière de l'agent sur la surface sableuse. En U.R.S.S. on utilise à cet effet les pulvérisateurs du type «OBT-1», montés sur les tracteurs «ДТ-75». Le dispositif de pulvérisation «OBT-1» est réglé de telle sorte que la largeur de la bande traitée soit de 6 à 8 m. En outre, on emploie un engin qui comprend une remorque porte-bitume (БКП-1) avec un dispositif pulvérisant spécialement étudié. L'engin en question est principalement destiné à fixer des pipe-lines, voies ferrées, routes sur un relief sableux assez doux.

Un autre engin a été également conçu pour l'application linéaire ou totale de liants sur les pentes au vent des barkhanes. Les liants sont appliqués de la manière suivante: l'engin avance sur les pentes des chaînes de barkhanes parallèlement à la crête, les pentes au vent sont traitées successivement depuis les couloirs jusqu'à la crête ou vice versa. La fixation totale des pentes au vent implique l'application des liants avec recouvrement sur les zones périphériques de la surface traitée. Les bandes de matière liante peuvent être appliquées en réseau.

L'engin est desservi par un seul opérateur et augmente le rendement

de 25 à 30 fois, tout en réduisant le prix de revient des travaux de fixation de trois à quatre fois par rapport à l'installation de protections mécaniques réticulaires.

L'Institut des transports ferroviaires de Tachkent a étudié deux types de pulvérisateurs sur rail en vue de la fixation des sables mouvants à proximité du remblai de la voie ferrée. Ces engins permettent de fixer une frange de sable large de 50 à 70 m le long de la voie.

La fixation des installations ponctuelles, telles que pylônes de lignes électriques et de télécommunications, qui traversent d'importantes chaînes de barkhanes, ainsi que la fixation des rives sableuses des canaux et des réservoirs peut être effectuée au moyen d'appareils transportables assurant la pulvérisation forcée du fixateur.

3.6. TECHNIQUES DU BOISEMENT DE PROTECTION

La phytoamélioration des sables mouvants tient nécessairement compte de la nature et du degré de mobilité des barkhanes, de la profondeur de la nappe phréatique, de la salinité des sables et des dépôts sous-jacents, des particularités du couvert végétal.

Une connaissance poussée du contexte écologique permettra de faire un choix judicieux des cultures améliorantes, de garantir le succès de l'amélioration agrosylvicole.

Il est à noter que la pulvérisation plus que suffisante des sables de barkhanes exclut la nécessité de préparer au préalable le sol en vue des semailles et des plantations. En revanche, on s'emploie à fixer la surface au moyen de divers types de protections mécaniques.

Dans l'ensemble des opérations d'amélioration agrosylvicole, l'on recourt le plus souvent aux plantes fixatrices ligneuses qui ont la capacité de fixer les sables et fournissent du bois de chauffage. La végétation herbacée, n'a qu'une importance secondaire. En effet, les plantes herbacées sont semées dans le cas où il est impossible de cultiver des arbrisseaux, ou bien lorsqu'il s'agit d'accroître les réserves de plantes fourragères.

Les forêts de protection sont mises en place par semis ou par plantation de brins. L'on peut obtenir de bons résultats en semant arbrisseaux et herbes sur les sables qui s'y prêtent, par exemple à l'intérieur des oasis irriguées, ou bien aux endroits où elles confinent aux sables mouvants et où les eaux souterraines sont peu profondes et relativement douces. Sur les sables très mouvants la préférence est accordée à la plantation, car les graines seraient vite soufflées et leurs pousses souffriraient beaucoup de la déflation ou de l'ensablement.

La plantation des végétaux fixateurs de sable s'effectue à l'aide de plants semis ou de boutures cultivés dans des pépinières ou préparés à l'avance dans des peuplements naturels. La plantation manuelle s'opère de la façon suivante: deux ouvriers suivent une ligne préalablement

tracée. L'un d'eux se sert d'un outil spécial, louchet (ou palot) ou plantoir de Kolessov, pour pratiquer sur le sable des fentes à la profondeur de 40 à 50 cm. Le second ouvrier y introduit les plants de manière à ce que le collet soit enterré, la bouture se trouvant à ras du sable. Ensuite le premier ouvrier recule de 10 à 15 cm pour replanter son louchet à la même profondeur dans le sable et, en deux mouvements rapprochant et écartant le louchet il enserre le plant de sable.

On vérifie sélectivement la plantation, si les plants sont mal fixés on les retire facilement du sable, tandis qu'un plant correctement planté et bien enserré est difficile à arracher.

La saison la plus propice au repiquage des plants dans les déserts du sud de l'U.R.S.S. coïncide avec les mois de janvier-février (mars à la rigueur) à condition que le sol soit humidifié à une profondeur de 40 cm. S'il ne l'est pas, les plantations peuvent être reportées à fin mars et doivent s'effectuer très rapidement.

Dans les déserts septentrionaux, l'on procède à la plantation en mars-avril, tout de suite après le dégel du sol qui peut alors être percé au louchet.

La plantation parmi les protections mécaniques réticulaires se fait en disposant les plants près des bords ou des coins et non pas au centre des enceintes.

La qualité des plants influe fortement sur leur prise, croissance et résistance aux facteurs défavorables. Les plants prennent jusqu'aux mois de mai-juin; en été ils dépérissent en partie, vu le manque d'humidité dans les horizons superficiels très desséchés.

Afin d'accroître l'adaptation et la prise des plants, ils sont soumis à un traitement favorisant la croissance.

Le semis de végétaux fixateurs de sable s'effectuent comme opération principale ou comme mesure complémentaire.

En général, l'ensemencement manuel se fait à la pioche. L'opération est effectuée dans le sable humide par deux ouvriers dont l'un soulève une couche de sable épaisse de 3 à 5 cm, tandis que l'autre jette dans la fente ainsi pratiquée les graines mélangées de sable.

En vue d'augmenter le rendement du semis à la volée, il vaut mieux l'effectuer à cheval ou à dos de chameau. On recommande pour enfouir les graines d'y faire passer une herse ou des moutons.

Semis de plantes herbacées fixatrices de sable. Parmi la végétation herbacée, on utilise volontiers l'*Elymus arenarius*, l'*Aristida*, l'*Agriophyllum* et quelques salsolacées herbacées.

Le semis à la pioche d'un hectare d'*Elymus arenarius* nécessite de 4 à 5 kg de graines. Il s'agit du semis en poquet (10.000 trous) qui se fait de préférence en automne, de septembre aux premières gelées. Les semailles se font après les premières pluies automnales dans le sable humide. Au printemps, il convient de semer l'*Elymus arenarius* tout de suite après la fonte des neiges, le sable n'ayant pas encore séché. Le semis printanier est moins efficace que le semis automnal.

Les procédés de culture des aristides sont relativement simples. Il n'est pas besoin de préparer spécialement le sol, surtout sur les sables mouvants. Toutefois, les semis doivent être protégés par la fixation de la surface sableuse contre l'action pernicieuse du vent. Sinon, la plupart des graines seraient soufflées ou ensablées. Les graines de l'aristide sont semées, en hiver et au printemps en poquets ou à la volée. Pour le semis en poquets, on pratique une fente à 5 à 10 cm de profondeur pour y enfouir quelques graines. L'on prend 4 kg de graines par hectare.

La culture des aristides peut également se faire par plantation partielle, de plantes adultes. Dans ce cas, les plants prennent à 90 %.

Mécanisation des travaux de phytoamélioration

La phytoamélioration d'importants massifs de sables de barkhanes met en œuvre des moyens mécaniques: engins de boisement ЖИИА-1, ЖИМБ-1 et autres mûs par des tracteurs à chenilles du type ДТ-75.

Les pentes au vent sont boisées par bandes orientées parallèlement à la crête de la chaîne. Les emplacements des cultures varient selon les types de relief (petites, moyennes, hautes et très hautes chaînes de barkhanes). Dans les interdunes les plants sont disposés entre et au bas des chaînes. Sur les barkhanes moyennes, les plants viennent occuper les couloirs et les deux tiers de la hauteur des pentes au vent. Dans les dunes hautes et très hautes seules les pentes au vent sont boisées à 2/3 de leur hauteur.

L'engin de boisement est desservi par un machiniste et deux ouvriers. En une journée de travail de sept heures, un engin peut planter dans les sables de barkhanes jusqu'à cinq mille plants.

Le semis mécanisé s'effectue au moyen de semoirs ou d'autres dispositifs.

Le semis des plantes fixatrices, notamment, des graines d'Elymus arenarius et de saxaoul, prend très bien s'il s'effectue à partir d'un avion (semis aérien).

L. Léontiev (1949) propose la technique suivante de semis aérien de saxaoul. Un avion survole une bande de 20 m de largeur à la hauteur de 25 m. Les graines dispersées jonchent le sol de façon irrégulière, denses au milieu, rares sur les côtés.

Les terrains où s'effectue le semis aérien sont de forme longitudinale de manière que l'avion puisse épandre en une fois la totalité de la semence sur une bande de 20 m. L'avion n'ensemence qu'une bande sur deux, c'est à dire qu'il laisse une bande vide entre deux ensemencées.

L'expérience du semis aérien des plantes fixatrices de sable dans diverses conditions en Asie Moyenne fournit les meilleurs résultats sur les sables à couvert végétal clairsemé et à nappe phréatique peu profonde (terres cultivées ensevelies confinant aux sables). La période allant de

décembre à février est la plus favorable à cette technique culturale.

Au cœur du désert, où les conditions sont plus rudes et, surtout, sur les sables de barkhanes dénudés l'efficacité du semis aérien se trouve réduite du fait du transport des graines vers les dépressions, de la déflation et de l'ensablement des pousses.

Demande en semence et en plants

L'on estime que le nombre de poquets par hectare de plantation continue réalisée à la main ne doit pas, pour toutes les cultures, être inférieur à 3000.

En aménageant des bandes larges de 3 m à espacement des poquets de 1 m, le total de plants par hectare sera de 3300.

On voit aujourd'hui s'accroître nettement le rendement des travaux de boisement des sables de barkhanes, ce qui s'explique par la mécanisation, d'une part et l'introduction de plants standard, de l'autre. Ceci a, entre autre, permis de réduire le nombre total de trous à 1000 — 1100 par hectare. Le nombre de trous préconisé assure la prise de 600 à 800 plantes par hectare, ce qui correspond à la densité végétale des biocénoses naturelles.

La demande en semence (semis manuel et mécanisé) est de 10 à 12 kg pour le *Calligonum*, de 7 à 8 kg pour la *Salsola paletziana* et le saxaoul (*Haloxylon*), de 4 kg pour l'*Aristida*, de 8 kg pour l'*Aellenia* et de 4 à 6 kg pour l'*Agriophyllum*.

Boisement des sables mouvants dans la partie européenne de l'URSS.

Des forêts destinées à la protection et à l'exploitation, des plantations protectrices pour la fixation des sables mouvants ainsi que des cultures réservées à des usages précis sont créées sur les terres sableuses à vocation agricole et sylvicole. Suivant le contexte naturel et économique, on choisit entre les plantations à coulisses, à courtines ou massives.

Les plantations forestières sur le sable sont de double destination: exploitation et protection et appartiennent aux forêts du premier groupe.

Les sables de la partie européenne de l'URSS se trouvent dans la zone d'humidification instable. Les sécheresses et l'érosion éolienne permanentes sont autant de facteurs défavorables. Les agrotechniques de pointe y viennent cependant à bout des phénomènes naturels défavorables.

Les spécialistes ukrainiens ont mis au point une méthode de boisement des sables steppiques, où le sable s'humidifie tous les ans à 3 ou 4 m d'épaisseur, par le pin. Tous les travaux de boisement sont mécanisés et s'opèrent de la façon suivante: on commence par marquer tous les 2,5 à 3 m des bandes de terrain à cultiver larges de 80 à 90 cm. Les herbes sont éliminées par une succession de herses à disques. Ensuite, l'on procède à l'ameublissement partiel du sol à une profondeur de 50 à 60 cm dans les limites des bandes marquées, en y introduisant de

l'hexachlorane contre les parasites radicivores. L'ameublissement du sol se fait par des pulvérisateurs PH-60 montés sur les tracteurs T-74, ДТ-75, ДТ-54.

Une bande de terre ainsi traitée s'élargit jusqu'à 150 cm grâce au marquage, à l'ameublissement et au traitement mécanisé. Ainsi, il reste dans les interlignes une bande de terre envahie par des herbes folles, large de 100 cm si les interlignes sont de 2,5, et de 150 cm si ces dernières sont de 3 m. Cette largeur est tout à fait suffisante pour protéger les sols et les cultures contre les effets de l'érosion éolienne.

Généralement, dans les sables des steppes et des forêts-steppes on recourt au pin (*Pinus*). Pour un hectare, on prend 5 à 6 mille plants d'un an pour les disposer en lignes espacées de 2,5 ou 3 m au pas de 0,7 — 0,8 m.

Dans les zones semi-arides de la partie européenne de l'URSS, dont les sables sont sujets à une déflation intense, on utilise largement la méthode d'enfouissement profond de plants de grande taille d'essences ligneuses sans employer de protections mécaniques. La méthode consiste à planter dans les sables de barkhanes des plantes enracinées hautes de 120 à 250 cm, à une profondeur de 60—70 cm. En enfouissant profondément les plants de grande taille on peut cultiver une végétation ligneuse dans les sables où la déflation agit à 40 cm de profondeur. Un autre avantage offert par les plants de grande taille est que leurs frondaisons se trouvent au-dessus de l'action directe du courant d'air chargé de sable.

Les racines végétales enterrées à 60—70 cm ne sont pas dénudées par le vent au cours de la végétation, elles deviennent plus robustes et ramifiées.

C'est à la troisième ou à la quatrième année de croissance que les plantes rendent le relief stable. Il en reste de 40 à 80 % par rapport à la quantité initiale, ce qui est suffisant pour la fixation des sables mouvants.

Pour boiser les sables en employant la technique d'enfouissement profond, il suffit de planter par hectare 2000 plants. Le schéma optimal est suivant: les interlignes orientées parallèlement à la crête des chaînes de barkhanes sont larges de 3 à 4 m, les plants étant mis en terre à 1,5 m d'intervalle.

L'importance des précipitations, la profondeur des eaux souterraines, la présence d'éléments nutritifs dans le sable sont autant de facteurs qui conditionnent le choix des essences. Ainsi, à l'ouest de la plaine Précaspienne, sur les sables pulvérulents à grains fins, où l'on enregistre 300 mm et plus de précipitations annuelles, la nappe phréatique se trouvant à 6 à 8 m de profondeur, la préférence est donnée au peuplier blanc (*Populus alba*). Sur des sables aux caractéristiques similaires, on peut également cultiver l'acacia blanc (*Acacia pseudoacacia*), l'orme (*Ulmus pumila*).

Sur les sables salins, on recommande le tamaris.

Vers le nord de la Caspienne, où les conditions sylvicoles sont beau-

coup plus rigoureuses, on procédera au boisement par la méthode d'enfouissement profond des cultures suivantes: Calligonum, saule caspien (*Salix caspica*), *Elaeagnus angustifolia*.

Il est à noter que la méthode d'enfouissement profond de plants de grande taille n'est pas répandue dans les régions arides de l'U.R.S.S. où la déflation qui sévit dans les sables de barkhanes transportant des couches de 70 à 100 cm d'épaisseur détruit les plants.

Entretien et exploitation des cultures forestières

Toutes les cultures demandent des soins minutieux durant les premières années de leur croissance. Il convient de protéger les végétaux contre les dégâts causés par le bétail et les protections mécaniques contre la destruction.

Si les plants et les pousses ont souffert de déflation et d'ensablement, ce qui est notamment le cas après des vents fréquents, il faut couvrir les tiges dénudées de sable ou d'herbe sèche qui arrête et accumule le sable. En même temps, les plantes ensablées seront dégagées.

Certaines plantes fixatrices de sable donnent au terme de la première année une solide pousse isolée (*Calligonum*, *Salix rubra*). Par la suite, il n'est pas désirable de maintenir cette forme du feuillage, car elle est peu résistante au vent, n'est pas susceptible d'en atténuer l'action et les plantes elles-mêmes cassent souvent. Afin d'éviter cela, il est nécessaire, dès le premier automne, d'élaguer les branches minces jusqu'à la souche pour provoquer la frondaison. Les brins coupés peuvent, éventuellement, servir de boutures.

On n'oubliera pas de compléter les plantations, car bon nombre de plants succomberont, pendant la première année, à la déflation et au manque d'eau. Généralement, dans les déserts du sud, on remplace au cours de la deuxième année quelques 30 % des plants et 50 % du semis de la première année. Au début de la troisième année on peut prévoir un repeuplement de l'ordre de 15 et 25 % respectivement.

Dans les déserts sableux septentrionaux, l'on procède au complètement des cultures forestières dans une moindre mesure, son importance étant calculée à l'automne en faisant l'inventaire des plants et des semis.

L'entretien ultérieur des cultures forestières consiste en coupes de régénération régulières. Si on ne procède pas à ces coupes, les peuplements vieillissent et dépérissent ne remplissant plus leur fonction protectrice. Outre qu'elles prolongent la vie des plantes, les coupes rationnelles fournissent une grande quantité de bois de chauffage.

Les emplacements des coupes régulières sont désignés tous les ans, de telle sorte que la coupe ne s'opère pas sur la totalité du terrain sablonneux fixé, mais par bandes perpendiculaires aux vent dominants. Les coupes non contrôlées sont à exclure. Les coupes planifiées auront lieu à la fin de l'automne, après la chute des feuilles, jusqu'au printemps.

Une première coupe dans une plantation de *Calligonum* et de *Salsola poletziana* peut avoir lieu au bout de 7 à 9 ans, et la seconde et les suivantes, tous les 4 à 6 ans, car les drageons ont une croissance nettement plus rapide que celle des graines et des boutures.

La régénération du taillis après les coupes d'hiver se passe normalement, donnant 100 % de récupération pour les plantations de *Calligonum* et 70 % pour celles de *Salsola poletziana*.

Une grande importance pour la préservation des plantations revient à la protection du semis naturel, surtout dans les années de précipitations abondantes, pendant la levée massive des semis. Les taillis sont alors retirés de l'exploitation pour 3 à 5 ans, suivant la rapidité du renouvellement.

Un traitement du sol et des coupes d'entretien seront prévus dans les protections forestières constituées de pins de peupliers, etc.

Le travail du sol est entrepris immédiatement après la plantation (ou le semis). Un premier ameublissement est effectué au moyen de herbes légères. Le sol est traité dans les rangées en cas de besoin, jusqu'à la jonction des feuillages.

Les coupes culturales sont destinées à créer les meilleures conditions pour la croissance du peuplement, à le rendre stable et durable, à prévenir la cassure due à la neige, à maintenir les plantations en bon état.

3.7. PROTECTION DES OUVRAGES D'INTERET ECONOMIQUE CONTRE L'ENSABLEMENT ET LA DEFLATION

La lutte contre les sables mouvants en URSS a toujours été liée à la protection d'ouvrages d'intérêt économique contre l'ensablement et la déflation.

La méthode de protection dépend du type de l'ouvrage, de ses particularités constructives. Ainsi, lorsqu'il s'agit d'une route ou d'un chantier de construction, il faut tout d'abord les protéger de l'ensablement. Les pipe-lines et les poteaux de lignes électriques exigent une protection contre la déflation, tandis que les canaux doivent être protégés contre l'ensablement du lit et la déflation des digues.

Les ouvrages répartis érigés dans le désert comprennent différents chantiers pétroliers, ainsi que des cités ouvrières.

L'expérience de la construction et de l'exploitation d'ouvrages répartis dans le désert du Kara-Koum montre que leur édification est liée à la destruction inévitable du couvert gazonné et végétal fixant les sables, destruction touchant une surface considérable. La largeur de la bande touchée par l'aplanissement et par d'autres travaux de terrassement et d'aménagement autour des chantiers varie de 100 à 500 m ce qui suffit pour former un courant permanent de vent chargé de sable, voire des formes éoliennes (manteaux, crêtes, petites barkhanes).

La protection des chantiers doit prévoir l'élaboration de mesures échelonnées sur trois étapes: 1. Choix de l'emplacement. 2. Travaux de terrassement. 3. Aménagement des protections.

Si les conditions technologiques le permettent, il est recommandé d'installer les chantiers là où les sables sont mieux fixés par la végétation et moins soumis aux phénomènes éoliens. Il faut profiter au maximum des terrains aux sols lourds, dépourvus de couverture éolienne (takys, kyrs, fragments de plateaux, etc.). Il ne faut absolument pas installer des chantiers de construction sur des sables mouvants dénudés.

Les conditions d'organisation des travaux de construction dans le désert sont fonction de l'épaisseur de la couverture éolienne.

Au Kara-Koum, d'importantes superficies de sables éoliens reposent sur des surfaces argileuses (takys), ou sur des surfaces consolidées (kyrs). Dans ce cas, il est nécessaire de procéder aux travaux de terrassement par méthode d'aplanissement négatif, c'est-à-dire d'araser le couvert éolien tout entier jusqu'au kyr sous-jacent. Les surfaces ainsi formées, privées de matériaux sableux ne se prêteront plus à la déflation par la suite, il ne s'y amassera plus de sable. Cependant, ceci n'est possible que lorsque tout le sol de réserve est déplacé du côté sous le vent du chantier. Sinon, les cavaliers de sable déplacés du côté au vent, subiront la déflation et le gros du sable finira par passer sur le chantier.

Dans les régions caractérisées par une grande épaisseur du couvert éolien, l'aplanissement négatif est impossible. Cependant, dans ces régions, il est aussi recommandé de déplacer le sol du côté sous le vent.

Si les conditions technologiques le permettent, il est raisonnable de faire aboutir toutes les lignes de communications menant aux chantiers du côté sous le vent, afin de préserver au maximum le couvert végétal des sables éoliens du côté au vent.

L'aménagement de l'ensemble protecteur comprend l'installation de protections réticulaires ou de bourrelets de sable traités par des matières fixatrices, le long desquels on sème ensuite des plantes fixatrices de sable.

Examinons le schéma de principe des mesures de fixation des sables. Il est important de déterminer la largeur optimale de la bande ou de la zone de protection. L'aménagement des terrains pour les chantiers de construction dans le désert de sable se fait généralement dans les conditions de sables gazonnés. Les dispositions en vigueur insistent sur la nécessité de réhabiliter les terres altérées par les travaux de construction, en l'occurrence le couvert gazonné et végétal, ce qui amène à la fixation obligatoire de toute la surface des sables qui aura été abîmée par les travaux de terrassement. Donc, la largeur de la bande ou de la zone est conditionnée par la technologie des travaux de terrassement, ainsi que par l'efficacité des mesures de protection et de prévention.

L'expérience des chantiers gaziers du Kara-Koum montre que la surface du couvert gazonné des sables détruit par les travaux de construction peut varier de 1,5—3 ha jusqu'à 70—100 ha. Donc, toute la surface des sables technogènes ouverts (occupés par l'équipement

technologique et par un revêtement artificiel sur le chantier même) doit être soumise à la fixation.

La protection des ouvrages industriels s'effectue d'après le schéma suivant (fig. 13). Sur le chantier, à l'intérieur du territoire clôturé, toute la surface libre de constructions est fixée par des bandes étroites (larges de 1 m et espacées de 2 m) avec plantation ou semis ultérieurs de plantes fixatrices des sables. Des sentiers spéciaux sont aménagés pour le personnel (2). En dehors du chantier, des protections réticulaires ou des bourrelets de sable (3) sont aménagés et, derrière eux, des

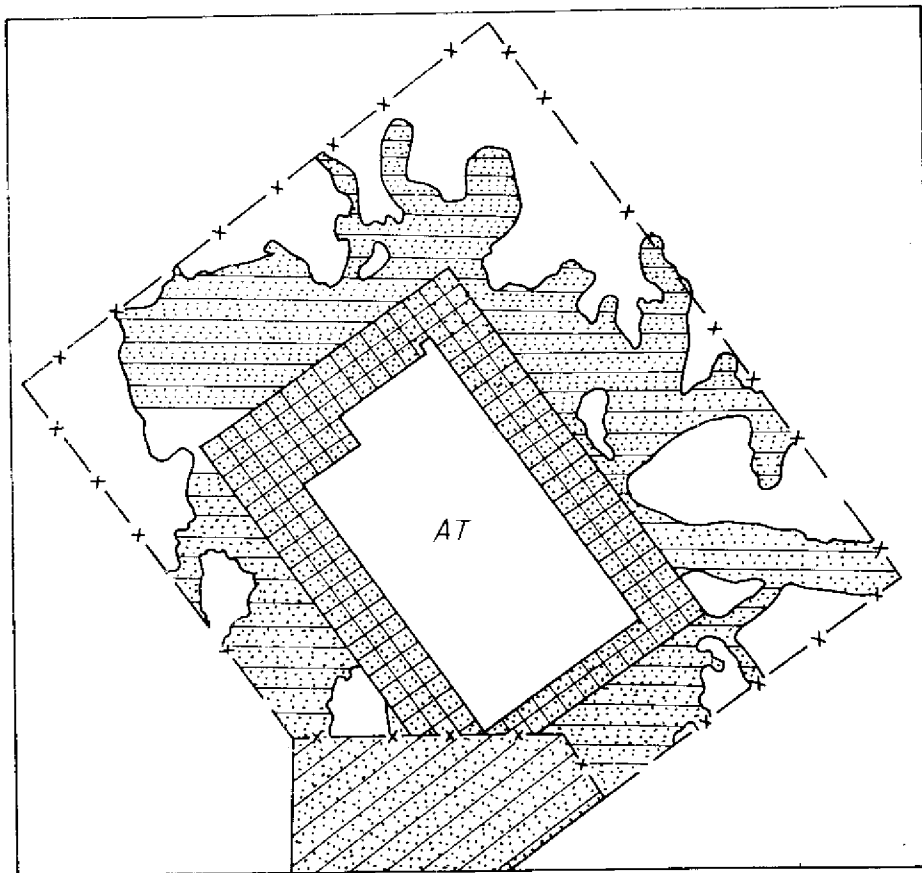


Fig. 13. Schéma de la protection d'un chantier gazier:
 1 -- sables gazonnés; 2 -- sables «technogènes»; 3 -- aire technologique; 4 -- protections réticulaires ou bourrelets fixés; 5 -- protections en bande étroite; 6 -- aire réservée aux services auxiliaires; 7 -- clôtures

protections en bandes étroites s'étendant sur toute la surface des sables endommagée au cours des travaux de construction. Sur ce terrain, la plantation de plantes fixatrices est également prévue. Les bandes doivent être orientées en travers des vents dominants, afin d'éviter la déflation des terrains entre les bandes (4). Les services annexes sont disposés du côté sous le vent. C'est là qu'il faut faire aboutir les voies d'accès (5). Toute la surface des protections des plantations, ainsi que le terrain avoisinant de sables gazonnés sont protégés dans un rayon d'au moins 500 m.

Parfois, les conditions technologiques ne permettent pas d'éviter l'installation de chantiers sur des sables mouvants dénudés. Alors la protection des chantiers devient difficile et coûteuse. Les dimensions et la configuration de la zone de protection dépendent dans ce cas de la vitesse et de la direction de la migration des sables. La largeur de la zone de protection est calculée à partir du volume de sable transporté par mètre courant, afin que le transport du sable et des formes dunaires soit complètement absorbé par les protections. Les meilleures protections sont celles en carreaux ou en bourrelets fixés parce qu'elles ont une grande capacité. Des psammophytes sont plantés le long des protections, et sur les terrains avoisinants, les sables mouvants sont stabilisés par la plantation de psammophytes dans les couloirs entre les barkhanes. Cette dernière mesure réduit la mobilité des formes dunaires et, par conséquent, diminue l'apport de sable vers les protections aménagées.

La protection des cités ouvrières prévoit:

1. Un revêtement en matériaux inertes (gravier ou pierres concassées de roches compactes) de la surface libre de constructions.

2. Un aménagement de la zone de protection du côté au vent de la cité où tout déplacement de moyens de transport, de mécanismes et de gens est interdit. A cette fin, la bande de sables gazonnés attenante à la cité est clôturée. Sa largeur varie de 100 à 500 m, en fonction de l'aptitude des sables à la déflation. Pour enrichir le couvert végétal, on procède, au cours des deux ou trois premières années, au semis et à la plantation libres de plantes fixatrices de sable. La zone protégée est repérée sur le terrain avant le début de la construction de la cité et clôturée. Les voies d'accès au chantier sont pratiquées du côté sous le vent.

A la pose des pipe-lines, il est nécessaire de les protéger de la déflation. Le transport de sable ne produit ici aucun effet indésirable, tandis que les accumulations sableuses peuvent être considérées comme un phénomène favorable. Le problème de la lutte contre les sables mouvants se réduit donc à l'élaboration de méthodes pour prévenir la déflation.

Dans un désert, les formes éoliennes du relief ont un degré différent de démembrement qui dépend du niveau de déflation limite local. Un pipe-line posé au-dessous du niveau de déflation limite local n'est pas soumis à la déflation tandis qu'au contraire, un enfouissement incomplet ou la pose sur un remblai aboutira à la déflation.

La pratique de la construction de pipe-lines dans les régions sablonneuses connaît en principe trois procédés de pose de tubes: sur remblai (Turkménie occidentale), sur remblai et en tranchées (gazoduc Boukhara-Oural) et en tranchées (gazoduc Asie Moyenne — Centre).

Les observations ont montré que les déflations intenses (en l'absence de protections ou dans le cas de leur destruction) sont les plus fréquentes pour le premier mode de pose. Les tubes posés en deuxième mode subissent une déflation considérable, tandis que celle-ci est bien moindre avec le troisième mode. Les cas de déflation de pipe-lines posés en tranchées sont dus surtout à des infractions au projet ou à des discordances entre la technologie des travaux de terrassement et la méthode de pose des tubes. Il est recommandé à cet effet de poser les tubes à 1,5—2 m au-dessous du niveau de la surface de sable aplanié suivant le profil des repères minima de la section du tracé.

Cette méthode s'avère efficace si, au cours de l'étude et de la construction, les dispositions suivantes sont rigoureusement observées:

— Profiler la zone d'aplanissement suivant le niveau des repères minima pendant la prospection du tracé d'un pipe-line dans les sables de barkhanes dénudés.

— S'il y a un remblai à élever, le fixer immédiatement après le comblement de la tranchée, dans les cas de pose de tubes dans des sables gazonnés présentant des dénivellations importantes et une raideur considérable des pentes.

— En creusant une tranchée dans les sables de barkhanes veiller à ce que la pente des parois soit au maximum proche de l'angle du talus d'éboulement naturel des sables, c'est-à-dire de 35° . Dans les sables gazonnés, le profil transversal des parois de la tranchée doit être concave et s'atténuer en bas, ce qui empêche l'éboulement du sable des parois.

Aplanir jusqu'à la surface sous-jacente toutes les formes éoliennes gazonnées inférieures à 3 m. Pour les formes éoliennes dépassant 3 m, aplanir les courbes abruptes des éléments du relief (pieds de pentes, sommets), afin que le profil de la tranchée ne dépasse pas l'angle de courbure naturelle du pipe-line, c'est-à-dire 5 à 6° , et poser le pipe-line suivant un profil enveloppant. Toutes les formes mouvantes du relief éolien doivent être rasées jusqu'au niveau de base.

— En procédant aux travaux de terrassement (planage de la bande et excavation de la tranchée) rejeter le sol sablonneux meuble seulement du côté sous le vent; en comblant les tranchées, ne prélever la terre que du côté sous le vent et essayer de ne pas abîmer les parois des tranchées. Damer le remblai de sable ameubli formé au-dessus de la tranchée, car à cause de la grande sécheresse, il n'y a pas de tassement du sol et le remblai serait érodé.

Afin d'éviter l'ensablement de la tranchée, il faut réduire au minimum le décalage temporel entre son excavation et la pose des tubes, surtout en traversant les secteurs où il y a des barkhanes. Dans le cas contraire, il faudrait recreuser la tranchée, ce qui est une opération forte

compliquée, comme on a pu observer au cours de la pose du gazoduc Asie Moyenne — Centre.

— Un contrôle géodésique permanent est nécessaire au cours de l'aplanissement du terrain et de la pose du pipe-line, ainsi que la supervision par l'auteur du projet pendant toute la période de construction.

Dans chaque région donnée, il faut procéder par étapes en élaborant les recommandations pour la pose de pipe-lines et leur protection contre la déflation. A la première étape, les recommandations concernent le choix du tracé du pipe-line dans le système du relief éolien; à la seconde, la technologie des travaux de terrassement, compte tenu du caractère du relief et du régime éolien; et à la troisième, la protection du pipe-line de la déflation. Les deux premières étapes sont réalisées pendant la prospection et l'établissement du projet, la dernière, après l'achèvement des travaux de construction.

En appliquant la méthode recommandée de pose et de protection des pipe-lines les travaux de fixation des sables ne s'imposent pas avant un an et demi à trois ans après la pose et le remblayage du pipe-line, exception faite; évidemment, des zones de risque exigeant des travaux urgents. Ceci s'explique par le fait qu'au cours de la période indiquée, on verra l'évolution du relief éolien abîmé par les travaux de terrassement et on décèlera plus facilement les sections du pipe-line sujettes à la déflation. C'est pourquoi le projet de construction d'un pipe-line ne doit prévoir que des recommandations sur le choix du tracé dans le système du relief éolien et la technologie des travaux de terrassement, tandis que des recommandations concrètes sur la protection du pipe-line doivent être élaborées au cours de son exploitation après un examen détaillé supplémentaire de l'ouvrage mis en place. Les frais des travaux de fixation du sable peuvent être compris dans les frais de réparation. En respectant les recommandations indiquées quant au choix du tracé et à la technologie des travaux de terrassement, la déflation du pipe-line sera réduite au minimum. Par recouvrement de matières liantes, on assurera la protection de sections localisées du pipe-line, sujettes à la déflation.

La pose d'un pipe-line principal dans les sables, surtout lorsqu'il s'agit d'une conduite à plusieurs tubes, aboutit souvent à la détérioration du couvert végétal dans la bande remaniée par les travaux de terrassement, à la formation d'amoncellements de sol sableux meuble dont la déflation fait naître des sables mouvants. Bien qu'il n'ait pas lieu sur une grande échelle, ce processus est à prendre en considération en procédant aux travaux de construction dans le désert.

La construction de pipe-lines principaux entraîne l'édification de nombre d'ouvrages industriels, en particulier, de routes, de stations de pompage, de cités ouvrières, etc. Il faut veiller à ce que ces ouvrages soient en dehors de la zone d'impact des sables mouvants formés sur le tracé. C'est pourquoi, les projets de construction doivent prévoir l'emplacement, par exemple, des routes du côté au vent du tracé.

La méthode recommandée pour la pose des pipe-lines n'exclut pas

la phytoamélioration pour fixer les sables. Après la fin des travaux de pose de tous les tubes d'un gazoduc et la construction des voies d'accès, on peut entamer les travaux de phytoamélioration dans les secteurs où les conditions sylvicoles le permettent.

Pour conclure, arrêtons-nous sur le rendement économique de la méthode recommandée. Les calculs ont montré que la méthode d'enfouissement maximal des pipe-lines fait augmenter (surtout dans les sables de barkhanes) le volume des travaux de terrassement de deux fois environ. Leur coût est égal à celui de l'aplanissement traditionnel par la méthode du profil moyen, plus le coût des travaux de fixation des sables utilisant la phytoamélioration. La méthode recommandée n'entraîne donc pas l'augmentation des dépenses totales. Mais, si l'on tient compte du fait qu'en appliquant cette méthode il n'est plus nécessaire d'effectuer les travaux onéreux et compliqués de fixation des sables (surtout dans les sables de barkhanes), et que le risque d'accidents dus à la déflation des pipe-lines non-fixés est réduit à zéro, on voit les avantages évidents de la méthode d'enfouissement maximal.

Les principes d'emplacement et de protection des **poteaux de lignes électriques** ont beaucoup de traits communs avec les méthodes de protection des pipe-lines. L'objectif essentiel est de prévenir la déflation.

En établissant le tracé, il faut se guider des mêmes principes: choisir le relief éolien le moins découpé et le plus gazonné, profiter au maximum des terrains stables à la déflation. Pendant les travaux de terrassement, la terre est déplacée du côté sous le vent.

En installant les poteaux dans des sables éoliens gazonnés, la fixation s'effectue autour du poteau sur l'aire endommagée par les travaux. Dans les sables de barkhanes, on fixe autour du poteau une butte dont la circonférence dépend de l'intensité de l'activité éolienne.

Les matériaux pour fixer la base des poteaux sont très variés, à côté des liants on recourt aux moyens locaux: tiges des plantes, galets, gravier, argile, etc.

Le schéma des mesures de protection des routes varie en fonction du cadre naturel et des conditions géomorphologiques (relief éolien, intensité de la déflation). Une route peut être tracée sur un relief gazonné ou sur un relief éolien à différents degrés de déflation.

Dans le premier cas, toute l'attention porte sur le choix de la direction à donner à la route dans le système du relief éolien. Le tracé doit s'insérer dans le relief en passant par le profil le moins découpé aux cotes zéro, le long de formes linéaires, restant de préférence dans les couloirs interdunaires ou d'autres dépressions.

Pour les routes, les travaux de protection sont prévus essentiellement du côté au vent, puisque c'est de là qu'on doit s'attendre à l'arrivée de sable. Tout le sable mouvant provenant de la dénudation naturelle ou des travaux de terrassement et accumulé du côté sous le vent se déplacera hors de la route sous l'action des vents dominants.

Il s'ensuit que la protection d'une route est sélective et importante

là où le tracé passe par de gros fossés, c'est-à-dire à l'intersection avec des dunes et des crêtes. Les tronçons de route traversant les couloirs interdunaires ou le fond des creux n'ont pas besoin d'être protégés.

Aux intersections avec des dunes, il existe toujours un danger d'ensablement si l'on ne prend pas de mesures de protection. En procédant à l'excavation d'un fossé pour une route traversant une dune ou une crête, le sol de réserve des cavaliers est déplacé dans le couloir interdunaire le plus proche (c'est le meilleur des cas, au pire, la terre est déplacée, par les mouvements transversaux de la machine, des deux côtés de l'excavation). Le talus du fossé crée ce que l'on appelle une ombre aérodynamique où s'amoncelle le sable venant des déblais et des sommets des dunes plus ou moins sujettes à la déflation. La coulée de sable, augmentant de volume, se déplace peu sur la partie carrossable de la route.

Il est important dans ce cas de tenir compte du régime éolien et de la direction du transport de sable à la planification des travaux de terrassement. Il est recommandé de déposer le sol de réserve (là où il est impossible de l'utiliser pour profiler la route) seulement du côté sous le vent. Il faut interdire de profiler la route par découpage transversal du terrain. Les machines ne doivent se déplacer que le long du profil.

Les méthodes de protection d'une route d'orientation sublatitudinale traversant un relief éolien attaqué de la déflation à degré différent, sont différenciées en fonction des conditions géomorphologiques.

Les mesures de protection préventives ont une importance majeure pour les routes dans les sables gazonnés. L'objectif essentiel est de préserver au maximum le couvert végétal, surtout du côté sous le vent. Pour cela, il est nécessaire d'aménager des zones de protection le long des routes aussi du côté au vent, où le pacage et le passage du bétail, la coupe des plantes sont rigoureusement interdits. Tous les travaux de terrassement à proximité de la route doivent être pratiqués du côté sous le vent. Si les impératifs techniques et économiques exigent des travaux de terrassement du côté au vent, ils doivent s'achever par la fixation de la surface sableuse endommagée. De plus, sur ces chantiers, les mécanismes et les moyens de transport se déplaceront du côté sous le vent.

Lors du tracé des routes dans **les sables mouvants**, le choix de l'orientation ne semble pas très important, car les conditions seront les mêmes pour la route de toute direction. Mais ce n'est qu'une apparence. Il est important de déterminer si le tracé de la route suit une orientation coïncidant avec la direction du transport total du sable et avec celle de la migration des formes éoliennes, ou bien va de biais par rapport à ce mouvement. Ces données permettent de prévoir l'ampleur des travaux de fixation des sables et les endroits où seront disposés de préférence les systèmes de protection.

Si l'orientation du tracé et la direction de la migration des dunes coïncident, le danger d'ensablement est minimal, puisque les formes se déplaceront parallèlement au remblai de la route. Dans ce cas, la protection du remblai se réduit à la création d'un profil fuselé du bord de la

route sous forme de surface fixée par des liants ou des matériaux inertes. Le schéma de principe de telle protection est donné sur la fig. 14a--c. Les dimensions optimales des ouvrages de protection (largeur des bandes et largeur totale de la zone de protection) varient en fonction de l'angle entre l'orientation du mouvement des formes dunaires et l'orientation du tracé. Avec l'augmentation de l'angle, lorsque le côté au vent est nettement précisé, c'est de ce côté-là qu'est transporté le gros des protections. Lorsque l'angle approche de 90° , la construction des protections du côté sous le vent n'a plus de sens.

Si le tracé forme avec la direction du mouvement des formes dénudées du relief éolien un angle proche de 90° , ce qui est le cas le moins favorable, il est nécessaire de créer un ensemble de protections du côté au vent (fig. 14c).

Les protections dans les sables de barkhanes doivent répondre à l'exigence essentielle qui est de prévenir l'arrivée de sable sur la chaussée. Elles doivent donc jouir d'une capacité suffisante pour «engloutir» les masses de sable déplacées, les arrêter et donner la possibilité aux plantes de l'enraciner. C'est pourquoi les techniques connues de protection des routes par bitumage, plein ou par bandes, de bas-côtés de la route, ou l'aménagement de protections semi-dissimulées, ne sont pas efficaces, car elles ne peuvent pas retenir le déplacement des sables de barkhanes.

La protection des voies ferrées a une longue histoire en Asie Moyenne. Le problème de la lutte contre les sables mouvants s'est posé dès 1880, avec le commencement de la construction du chemin de fer caspien. Les méthodes de protection ressemblent à celles formulées pour les routes. Cependant, pour la protection des voies ferrées les exigences sont plus sévères. Par exemple, si le transport de sable par le courant éolien sans accumulation est admis, pour les routes, cela est absolument exclu pour les voies ferrées. C'est dû au fait que les rails créent une ombre aérodynamique pour le courant éolien de sable qui provoque l'ensablement. Les protections utilisées pour les voies ferrées avaient toujours une grande capacité et étaient réalisées sous forme de rangées ou d'enceintes qui arrêtaient complètement le déplacement de sable aussi bien sous forme de courant éolien que de dunes. Au début, les protections mécaniques étaient faites de panneaux de bois, de planches ou de traverses, puis d'arbrisseaux et d'herbes disposés en bande étroite le long de la voie ferrée. Les protections en roseaux ou massettes étaient les plus répandues. Parfois, on plantait ou semait des psammophytes. Tous ces travaux étaient effectués à la main et, par conséquent, revenaient très cher.

A présent, on recourt le plus souvent à la méthode intégrée de protection des voies ferrées contre l'ensablement qui prévoit :

1. Fixation des sables mouvants le long de la voie ferrée. La largeur de la bande protectrice dépend du degré de la résistance de la surface sableuse à l'érosion éolienne. La fixation se fait à l'aide de fixateurs chimiques, de tranchées, de bourrelets, etc.

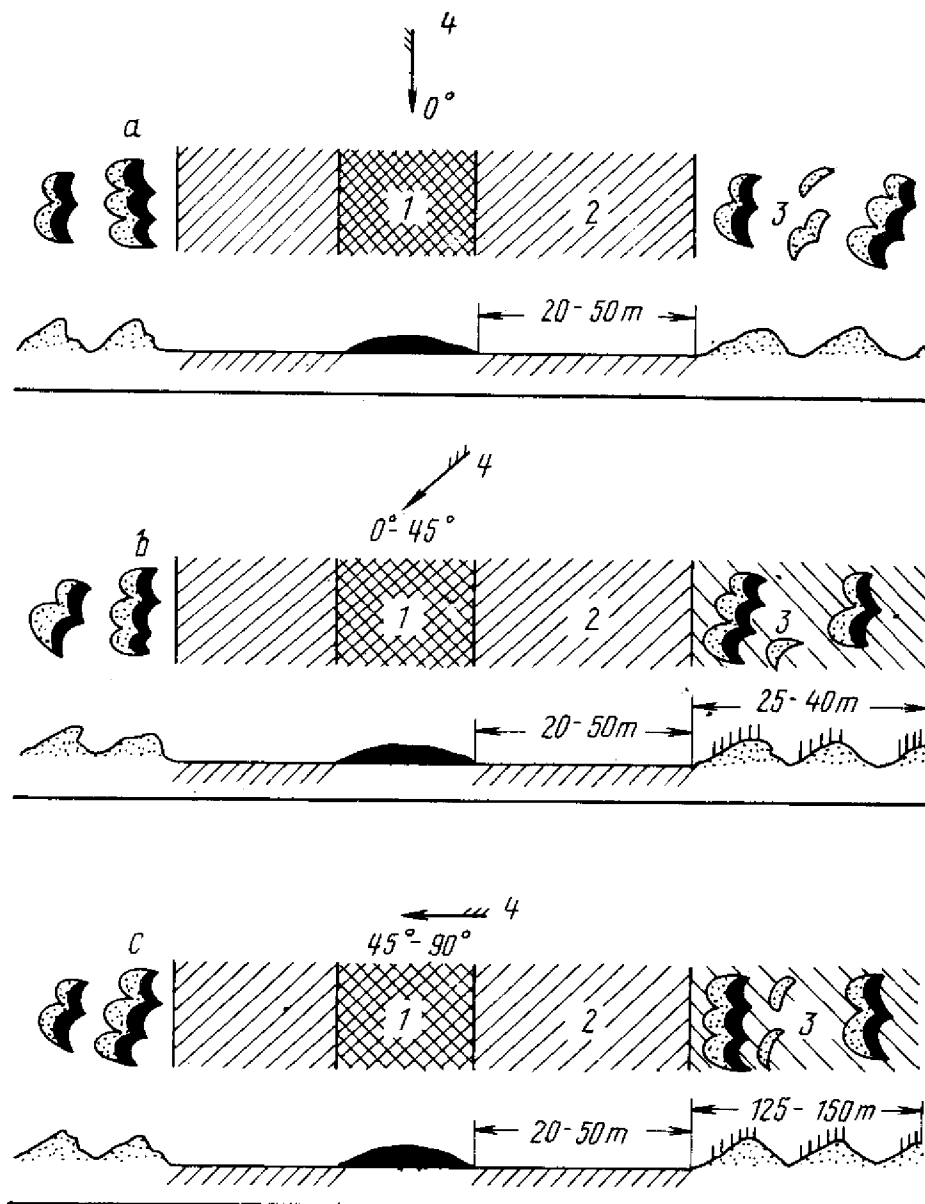


Fig. 14. Schéma de la protection d'une route traversant des sables de barkhane: 1 — route; 2 — bas-côtés de la route; 3 — zone de protection; 4 — direction du mouvement des sables mouvants

2. Semis et plantation de psammophytes le long des protections aménagées.

3. Aménagement de terrains boisés de protection le long de la voie ferrée.

4. Sauvegarde des protections des plantations artificielles et de la végétation naturelle de la zone s'étendant le long de la voie ferrée. La largeur de la zone fixée et protégée le long de la voie ferrée varie, en fonction des conditions physiographiques, de plusieurs centaines de mètres à un kilomètre.

La méthode intégrée de protection prévoit la mécanisation maximale des travaux. C'est elle qui correspond le mieux aux exigences de la protection de la nature et de la reproduction des ressources naturelles dans le désert.

La lutte contre les sables mouvants sur les canaux d'irrigation se réduit à prévenir l'ensablement des lits et la déflation des digues de sable. Les méthodes utilisées sont analogues à celles appliquées pour les routes et les voies ferrées. Cependant, compte tenu de l'humidification élevée des terrains par les eaux d'infiltration, ce qui améliore les conditions sylvicoles sur les sables, ainsi que de la disponibilité d'eau pour l'irrigation, la phytoamélioration des sables mouvants sur les canaux est la méthode la plus efficace de la lutte contre les sables mouvants. D'autre part, des essais ont montré qu'il est possible de se passer de travaux de fixation des sables et d'aménagement de protections, si l'on répète 2 ou 3 fois par an l'arrosage des plantations sur les digues du canal. L'humidification supplémentaire, à elle seule, empêche les processus de déflation sur les digues, favorise efficacement le développement des psammophytes et l'ensemencement naturel, ainsi que la végétation spontanée sur les sables mouvants. Toutefois, en dehors des digues, sur le territoire attenante où il est plus difficile d'organiser l'arrosage des plantes sur les sables mouvants, il est nécessaire de procéder à la fixation du sable par les méthodes décrites plus haut.

Outre la déflation des sables sur les canaux passant par des terrains sableux, le problème se pose de prévenir l'érosion par l'eau des bords du canal aboutissant parfois à l'affouillement des digues et à l'envasement du lit. Pour la consolidation des berges il est recommandé, sur la pente au vent des digues, de planter des arbres et des arbrisseaux hydrophiles. Pour diminuer l'impact de l'infiltration des eaux du canal dans les lits traversant des terrains sableux, il faut recourir à ce qu'on appelle «le drainage biologique» par l'aménagement sur les digues de bandes forestières composées d'essences à haute capacité de transpiration.

L'accomplissement réussi de l'ensemble des travaux (phytoamélioration des sables, consolidation des berges, aménagement du «drainage biologique») de concert avec les mesures obligatoires de protection de l'environnement permet de créer un paysage original aux conditions écologiques favorables dans la zone du canal.

CONCLUSION

La mise en valeur des déserts à l'époque de la révolution scientifique et technologique est une tâche difficile et pleine de responsabilité. Cet effort nécessite, en effet, d'une part, d'importants investissements, une approche spécifique, des méthodes et des techniques appropriées, et d'autre part, une corrélation directe avec les impératifs de la protection de l'environnement, l'amélioration du contexte écologique, la prévision scientifique des suites néfastes découlant de l'intervention humaine dans l'équilibre écologique. La préservation des biocénoses arides dans les conditions d'une activité économique intense demande un perfectionnement continu de l'organisation et de la technologie de l'aménagement du territoire, le recours à une série de mesures spécialement étudiées.

La perturbation de l'équilibre écologique dans les régions arides amène à une désertification progressante. Ainsi, des processus de salinisation se développent sur les terres irriguées, alors que le développement excessif des pâturages et les coupes désordonnées de la végétation ligneuse sont à l'origine des foyers de déflation et des massifs de sables mouvants.

Afin de prévenir les processus de désertification sur les pâturages désertiques, l'on procède, en U.R.S.S., à l'irrigation et au boisement. Au cours du dixième quinquennat, quelques 37,6 millions d'hectares de pâturages situés dans les régions désertiques, semi-désertiques et montagneuses ont été irrigués. En même temps, on se propose d'irriguer, dans le cadre du onzième plan quinquennal (1981—1985) rien que dans la zone désertique, 23,9 millions d'hectares, dont 15,0 millions au Kazakhstan et 6,9 millions au Turkménistan.

La valorisation de nouvelles terres et la construction d'importants ouvrages d'irrigation suscitent, dans certaines conditions pédo-climatiques, l'apparition de l'érosion par l'eau et le vent. Pour y faire face, on s'applique à réaménager le réseau d'irrigation, à implanter des bandes de protection boisées, à fixer et à boiser les ravins, les rives des canaux et des réservoirs d'eau.

Ces dernières années, on a créé en Ouzbékistan, le long des canaux, 1480 km de bandes de protection riveraines; les bandes à plusieurs rangées et les bois s'étendent sur 6800 ha; les jardins et les vignes, sur 1260 ha. Les plantations sylvicoles qui longent le canal du Kara-Koum s'élèvent à 12,3 mille hectares.

Quant aux brise-vents, ils sont aménagés dans les zones où l'érosion éolienne est très intense. La superficie totale des plantations de ce type a dépassé 6 mille ha au Turkménistan et 28 mille ha en Ouzbékistan, essentiellement dans la région de Ferghâna centrale, dans la Steppe Affamée et de Karchi.

A la mise en valeur des déserts de sable en Union Soviétique, on prête une attention soutenue à la sylviculture aux fins d'amendement et de protection, d'obtention de bois et de produits dérivés, ainsi qu'à l'utilisation des terres en tant que pâturages.

Les techniques de fixation des sables mouvants ont permis de mener à bien les travaux de protection des ouvrages contre l'ensablement. Ces techniques sont appliquées de manière différenciée en fonction des conditions sylvicoles, de l'intensité du régime éolien et de la nature de l'ouvrage concerné.

La méthodologie de l'amélioration agrosylvicole des sables en U.R.S.S. prévoit, entre autres mesures, le boisement et la fixation des sables au moyen de plantes fixatrices aborigènes. Cependant, dans des conditions particulièrement rudes, on recourt à diverses protections mécaniques et aux procédés d'amélioration physico-chimiques, à savoir l'application de films de bitume, de nérozine, de polyacrilamide et d'autres polymères.

L'amélioration des terres par des techniques sylvicoles, en tant que la méthode écologiquement la plus stable de fixation des sables mouvants s'opère dans les directions suivantes:

— création de bandes de protection aux confins des oasis, des champs et le long des canaux constituées de cultures ligneuses locales et introduites, avec irrigation. L'exemple d'une bande de protection semblable est donnée par la bande boisée, longue de 120 km et large de 4 km (saxaoul noir) à la frontière septentrionale de l'oasis de Boukhara;

— création de protections boisées dans les régions désertiques d'élevage, pour protéger le bétail contre les vents violents et pour améliorer la base fourragère;

— régénération du couvert végétal là où il est détruit par les exploitations minières à ciel ouvert, par l'aménagement de routes, de pipe-lines, etc.;

— boisement et fixation des sables mouvants et lutte contre l'ensablement. Nombre de problèmes importants se posent à ce sujet: la mise au point de techniques de boisement des sables aux alentours des oasis, afin de protéger les terres irriguées, canaux, localités, routes, voies ferrées, etc.

A l'heure actuelle, des travaux de boisement et de fixation des sables mouvants, ainsi que d'autres mesures de protections, sont réalisés en

Ouzbékistan sur 608 mille ha et au Turkménistan sur 300 mille ha. Durant le dernier quinquennat (1976—1980), on a effectué le semis et la plantation de cultures forestières dans les sables, les montagnes et les terres irriguées sur une superficie de 367,3 mille ha. Les prévisions du plan quinquennal suivant (1981—1985) porteront ce chiffre à 455 mille ha, dont 450 mille ha de sables.

La mise en place de bandes de protection des pâturages sableux formées de saxaoul noir (*Haloxylon*) est de nature à élever sensiblement le rendement de ceux-ci et montre les avantages d'un aménagement agrosylvicole rationnel. En effet, les plantations d'arbres et de buissons élargissent considérablement le fonds des pâturages d'hiver. Ces pâturages peuvent servir à partir de la deuxième ou la troisième année, ils sont utilisables durant une trentaine d'années, sans être entretenus. Les pâturages de ce type permettent de modifier le caractère saisonnier des pâturages naturels, de les enrichir de pâturages utilisables toute l'année et d'en élever le rendement de plus de trois fois.

L'Institut des déserts près l'Académie des Sciences de Turkménie a établi expérimentalement qu'il était possible de cultiver des plantes fourragères grâce à l'irrigation par aspersion sur des sables mouvants situés à l'intérieur ou à la périphérie des oasis. En épandant des engrais chimiques et organiques en quantités habituelles et en maintenant la norme d'arrosage à 5500 à 6500 m³ par hectare, on peut récolter sur ces sables 500 à 800 quintaux de fourrage vert de maïs et de sorgho par hectare. La mise en valeur agricole des sables des oasis permet de rendre à l'agriculture des terres jusqu'ici incultes, de fixer les sables mouvants, de prévenir la salinisation des sols, de dépenser judicieusement l'eau d'arrosage.

Cependant, malgré les succès remportés dans ce domaine, le problème de la fixation et de la valorisation des sables mouvants garde son acuité. Et pour en venir à bout, les chercheurs et spécialistes de maints pays doivent conjuguer leurs efforts.

BIBLIOGRAPHIE

K.Z. Amirasanov, I.A. Aliev, L.V. Kovdychéva. Priménénie khimitcheskikh strouktouroobrazovateléi v horbé s déflatsiéi v ousloviakh Apchérona (Utilisation des amendements chimiques pour lutter contre la déflation dans des conditions d'Apchéron). — Problémy osvoiéniá poustyn, 1974, N.3, p. 85–87 (en russe).

A.G. Babaiev. Oazisnyé peski Tourkménii i pouti ikh osvoiéniá. (Sables d'oasis en Turkménie et leur mise en valeur.) Achkhabad, Editions «Ylym», 1973, p. 354 (en russe).

A.G. Babaiev, Z.G. Freikine. Preobrazovanié poustyn SSSR; (Transformation des déserts de l'U.R.S.S.). Moscou, Editions «Znanié», 1976, p. 52 (en russe).

A.G. Babaiev, Z.G. Freikine. Poustyni SSSR vtchéra, ségodnia, zavtra. (Déserts de l'U.R.S.S.: hier, aujourd'hui, demain). Moscou, Editions «Mysl», 1977, p. 352 (en russe).

L.N. Babouchkine. Agroklimaticheskoié opissanié Srednei Azii. (Description agroclimatique de l'Asie Centrale). Troudy de TachGU (Ouvrages de l'Université de Tachkent), fasc. 236, 1964, p. 5–185.

T.G. Berliand. Radiatsionny i téplovoi balans poustyni. (Bilan radiant et thermique du désert). — Troudy ITO, 1948, fasc. 10 (72).

V.A. Chamchine. Sposob zakrepliéniá podvinykh peskov. (Procédé de fixation des sables mouvants). A.S. N.417102. Découvertes, inventions, échantillons industriels, labels. 1974, N. 8 (en russe).

Z.Ch. Chamsoutdinov. Sozdanié dolgoletnikh pastbichtch v aridnoi zóné Srednei Azii. (Création de pâturages permanents dans la zone aride de l'Asie Moyenne). Tachkent: FAN, 1975, p. 174 (en russe).

T.I. Fazilov, N.P. Bournaiev. Polivotchnyi pojezd A.S. N. 344064 — Découvertes, inventions, échantillons industriels, labels, 1972, N.21.

T.I. Fazilov. Zachtchita jeleznykh dorog ot pestchanykh zanossov viajouchtchimi sredstvami. (Protection des voies ferrées contre l'ensablement à l'aide des liants.) — Problémy osvoiéniá poustyn, 1972, N.3, p. 84–88.

T.I. Fazilov. Téoréticheskíe osnovy zachtchity jeleznykh dorog ot pestchanykh zanossov viajouchtchimi vechtchestvami. (Principes théoriques de la protection des voies ferrées contre l'ensablement à l'aide des liants.) — Problémy osvoiéniá poustyn, 1976, N.4, p. 164–172.

B.A. Fedorovitch. Réliéf peskov Azii kak otobrajénié tsirkouliatsii atmosféry. (Le relief des sables de l'Asie est le reflet de la circulation atmosphérique). — Problémy fizicheskoi guéografii, 1948, fasc. 13, (en russe).

B.A. Fedorovitch, A.G. Babaiev, A.S. Kes. Prirodnýe ouslovia poustyn Srednei Azii i Kazakhstana i pouti ikh osvoiéniá. (Conditions naturelles des déserts de l'Asie Centrale et du Kazakhstan et voies de leur mise en valeur). In: Prirodnýe ouslovia,

jivotnovodstvo i kormovaj basa poustyn. (Conditions naturelles, élevage et base fourragère des déserts). Achkhabad, Editions de l'Académie des Sciences de la R.S.S. de Turkménie, 1963, p. 7–22 (en russe).

A.S. *Fomina*. Nérozine-klumitcheskoié sredstvo dlia borby s érosiei potchv. (Le nérozine, composé chimique contre l'érosion du sol). — In: Zachtchita potchv ot érosii (Protection de sols contre l'érosion). Moscou, Editions «Kolos», 1971 (en russe).

V.S. *Gabai*. Poliakrilamid i zakreplénie podvijnykh peskov. (Polyacrylamide et fixation des sables mouvants). — Vestnik sel'skokhoziaistvennoi nauki. 1965 fasc. 7, p. 33–38.

V.S. *Gabai*, A.S. *Podgornov*, V.A. *Chamchine*. Priménénie nérozina dlia borby s déflatsiei na podvijnykh peskakh. (Utilisation du nérozine contre la déflation dans les sables mouvants). — Problémy osvoénia poustyn, 1971, N.4.

V.F. *Gorbatcheva*. Zakreplénie barkhannykh peskov emoulsiei poliakrilamida. (Fixation des sables de barkhanes par l'émulsion du polyacrylamide). — Izvestia AN Tourkmenskoi SSR, série biologique, 1964, fasc. 2.

A.A. *Grigoriev*, M.I. *Boudyko*. Klassifikatsia klimatov SSSR. (Classification des climats de l'U.R.S.S.) — Izvestia AN SSSR, série géographique, 1959, N.3.

A.V. *Gvozdikov*. Nékotoryé voprosy teorii i praktiki zakreplénia i obléssénia peskov Srednéi Azii (Quelques problèmes théoriques et pratiques de la fixation et du boisement des sables en Asie Moyenne). — Oeuvres de l'Institut d'agriculture de Tartarie, N.13, 1966.

A.P. *Ivanov*. Kompleksny spossob zachtchity avtomobilnoi dorogui ot pestchanykh zanossov v osloviakh podvijnykh peskov. (Méthode intégrée de protection des routes contre l'ensablement dans les conditions des sables mouvants). Problémy osvoénia poustyn, 1975, p. 87–90.

N. *Kadyrov*, K.S. *Akhmedov*. Vlianie PH srédy na strouktouroobrazouïouchiou spossobnost poliakrilamida 1 i Ca-poliakrilamida. (Influence du PH du milieu sur la capacité de gélatinisation du polyacrylamide 1 et du Ca-polyacrylamide). In: Polimernyé i guminovyé preparaty v narodnom khoziaistvé. Tachkent, Editions «Naouka», 1964.

N.E. *Kokcharova*, I.P. *Svintsov*, K. *Choukourov*. Rékomendatsii po sozdaniou postoiannykh léssosséménnykh outchastkov v tchernosaksaulnikakh. (Recommandations relatives à la création de terrains porte-graine dans les forêts d'Haloxylon Aphyllum), Tachkent, 1977, p. 26.

N.F. *Koulik*. Vodnyi réjim peskov aridnoi zony. (Le régime hydraulique des sables de la zone aride). — Léningrad, «Guidrométeoizdat», 1979.

N.F. *Koulik*, V.I. *Pétrov*, A.F. *Goussikov*. Izoutchénié protsessov déflatsii po kosmitcheskim snimkam. (Etude des processus de déflation à l'aide de la photographie spatiale). — Problémy osvoénia poustyn, 1980, N.4, p. 95–96.

L.Y. *Kourotchikina*. Psammofilnaia rastitelnost poustyn Kazakhstana. (Végétation psammophile des déserts du Kazakhstan). Alma-Ata, Editions «Naouka», 1978, p. 272.

K.V. *Kouvtinova*. Oprédélénie isparénia métopom téploвого balansa (Détermination de l'évaporation par la méthode du bilan thermique). — In: Linzy presnykh vod poustyni (Les lentilles d'eau douce des déserts). — Editions de l'Académie des Sciences de l'URSS, Moscou, 1963.

V.I. *Kravstova*, T.B. *Kouzina*, S.V. *Lutsaou*. (Utilisation de la photographie spatiale et aérienne pour l'interprétation du relief éolien). — Guéomorfologia, 1976, N.1.

A.A. *Léontiev*. Opyt aéroséva saksaula v Tourkménii. (Expérience du semis aérien de l'Haloxylon en Turkménie). In: «Less i step», 1949, N.8.

A.A. Léontiev. Pestchanyé poustyni Srednei Azii i ikh léssomélorativnoïé osvoïenié. (Les déserts de sable de l'Asie Moyenne et leur bonification forestière). Tachkent, Editions «Gossizdat» de la RSS d'Ouzbékïe, 1962, p. 157.

A.A. Léontiev, N.E. Kokcharova, I.K. Kourbanov. Agrotekhnitcheskié ouslovia po lessoméloratsii pestchanykh territorii Ouzbékïstana. (Conditions agrotechniques de la bonification forestière des terrains sableux de l'Ouzbékïstan). Tachkent, 1973, p. 54.

E.V. Lobova. Potchvy poustynnoi zony SSSR. (Sols de la région désertique de l'U.R.S.S.). Moscou, Editions de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., 1960, p. 364.

H.S. Mann. Prochloïé i boudouchtchéé poustyni Tar. Borba s opoustynivaniem poutem kompleksnogo razvitiâ. (Le passé et l'avenir du désert de Thar. Lutte contre la désertification par le développement intégré). Résumé du rapport. — Tachkent, 1981.

P. Mekhdizâdé. Barkhany — pobotchnyi produkt vzaimodéistviya tchélovéka s okroujaïouchtchéï srédoi (Les barkhanes, sous-produit de l'interaction de l'homme et de l'environnement). — In: Zémelnyé ressourcy mira, ikh ispolzovanié i okhrana (Les ressources de terre du monde: utilisation et protection), vol II, Moscou, 1980.

S. Milas. Poiski réchéniï problémy v Tchili. «Problémy opoustynivania» (Les recherches de solutions au Chili. «Les problèmes de la désertification»). Moscou, 1981.

K. Mirzajanov, S. Mailibaïev. Erosia potchv i méry borby s nei. (Erosion des sols et mesures à prendre). (Résumés des rapports de la Conférence scientifique de l'Asie Moyenne sur la bonification des terres et la lutte contre l'érosion des sols). Tachkent. NIKhI, 1974, p. 21—23.

G. Moukhamédov. Ouloutchénié pastbichtch Tsentralnykh Karakoumov. (Amélioration des pâturages du Kara-Koum central). Achkhabad, Editions «Ylym», 1979, p. 124.

S.V. Nerpine, I.B. Révout. Ispolzovanié polimérov dlia borby s érosiéï potchv. (Utilisation des polymères dans la lutte contre l'érosion des sols). — In: «Protection des sols contre l'érosion» (Zachtchita potchv ot érosii). Moscou, 1964.

N.T. Nétchaéva, S.N. Prikhodko, A.N. Bachkatova. Ouloutchénié pastbichtch i sozdanié bogarnykh senokossov v poustynnoi zoné Tourkménïstana. (Amélioration des pâturages et création de prairies sans arrosage artificiel dans la zone désertique de la Turkménïe). Achkhabad, Editions de l'Institut d'élevage et de médecine vétérinaire, 1958, p. 46.

B.N. Nouryiev. O priménénii polimernogo préparata K-4 dlia zakreplénia peskov. (Utilisation du produit polymère K-4 pour la fixation des sables). — Problémy osvoénia poustyn. 1967, N.2, p. 85—88.

B.N. Nouryiev, E.A. Aripov, K.S. Akhmédov. Zakreplénie podvijnykh peskov glinistymi souspenziâmi, obrabotannymi polimérami K-4, ΠΑΑ i lateksom. (Fixation des sables mouvants au moyen de suspensions argileuses traitées par les polymères K-4, ΠΑΑ et par le latex). — Problémy osvoénia poustyn, 1969, N.5.

B.P. Orlov. K izoutchéniou ékologuitcheskikh ouslovii v Iougo-Vostotchnoi tehasti zakaspiiskikh Karakoumov. (Contribution à l'étude des conditions écologiques de la partie sud-est du Kara-Koum transcaspien). — Oeuvres de botanique appliquée vol. 19, fasc. 4, 1928.

G.S. Orlovski. Nékotoryé dannyé o pylnykh bouriakh Tourkménii (Quelques données sur les tempêtes de poussière en Turkménïe). — In: GMO d'Achkhabad, 1962, fasc. 3, p. 17—41.

A.O. Ovezliev et autres. Fitoméloratsia poustyn Tourkménïstana. (Phytoamélioration des déserts de Turkménïe). Achkhabad, Editions «Ylym», 1979, p. 116.

A.O. Ovezliev, I.P. Svintsov, Y.A. Romanov. Zakreplénie i oblésenie peskov Srednéamoudarinskogo oazissa. (Fixation et boisement des sables de l'Oasis du cours moyen de l'Amoudaria, Recommandations). Achkhabad, Editions «Ylym», 1972, p. 24.

V.P. Parchikov. Erosia potchv na pakhotnykh zemliakh s bougristo zapadinnym reliefom i aérométody ikh outchiota i otsenki v Irkoutskoi oblasti. (Erosion du sol des terres labourables à relief mamelonné et méthodes aériennes de leur invento- risation et évaluation dans la région d'Irkoutsk). — Irkoutsk, 1968.

M.P. Petrov. Podvijnyé peski i borba s nimi. (Sables mouvants et lutte contre eux). Moscou, Editions de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., 1950, p. 454.

M.P. Petrov. Poustyni zemnogo chara. (Les déserts de la Terre). Léningrad, Editions «Naouka», 1973, p. 336.

M.P. Petrov. Okhrana prirody i vosproizvodstvo prirodnykh ressourcev. (Pro- tection de la nature et reproduction des ressources naturelles). Moscou, VINITI, 1977, vol. 3, p. 145.

M.P. Petrov. Mirovoi opyt oblésenia i zakreplénia podvijnykh peskov v poustyniakh zémnogo chara. (L'expérience mondiale de boisement et de fixation des sables mouvants dans les déserts du globe terrestre). — Editions de l'Université d'Etat de Léningrad, 1974.

A.S. Podgornov. Zakreplénie podvijnykh peskov viajouchtchimi véchtchéstvami. (Fixation des sables mouvants par des liants). Obzornaja informatsia. Moscou, 1980.

I.B. Révout, A.B. Peizner, I.A. Romanov, A.A. Korotkova. Priménénie lateksov i ikh smessei s emoulsiéi minéralnykh massel dia borby s vetrovoi érosiéi. (Utilisation des latex et de leurs mélanges avec l'émulsion d'huiles minérales pour lutter contre l'érosion éolienne). — In: Fisika i biofisika potchv. (Physique et biophysique des sols), fasc. 19, AFI, Léningrad, 1969, p. 116—127.

A.N. Rodé. Osnovy outchénia o potchvennoi vlagué. (Fondaments de la science de l'humidité du sol). — Léningrad, vol. 2, «Guidrométéoizdat», 1969.

N.N. Romanov. Pylnyé bouri v Srednéi Azii. (Tempêtes de poussière en Asie Moyenne). Oeuvres de l'Université d'Etat de Tachkent, 1960, fasc. 1974, p. 198.

S.A. Sapojnikova. Carta-skhéma tchisla dniéi s pylnymi bouriami v jarkoi zóné SSSR i na primykaïouchtchikh k nei territoriakh. (Carte-schéma du nombre des jours à tempêtes de poussière dans la zone torride de l'U.R.S.S. et les territoires limitrophes). — Oeuvres du NIIAK, 1970, fasc. 65, p. 61—69.

O.I. Soubbotina. Znatchitelnyé i silnyé ossadki. (Précipitations importantes et fortes). In: Opasnyé guidrométéorologitcheskié yavlénia v Srednei Azii (Phé- nomènes hydrométéorologiques dangereux en Asie Moyenne). Léningrad, Editions «Guidrométéoizdat», 1977, p. 163—183.

I.P. Svintsov. Lessomélioratisia peskov. (Bonification forestière des sables) In: Opyt borby s opoustynivaniem v SSSR. (Expérience de la lutte contre la déserti- fication en U.R.S.S.) Moscou, Editions «Naouka», 1981, p. 86—106.

V.L. Schoults. Réki Srednéi Azii (Les cours d'eau de l'Asie Moyenne), p. I et II: Léningrad, «Guidrométéoizdat», 1965, p. 691.

O.M. Tchelpanova. Klimat SSSR. (Climat de l'U.R.S.S.). Fasc. 3, Asie Moyenne. Léningrad, Editions «Guidrométéoizdat», 1963, p. 448 (en russe).

V.M. Tchetyrkine. Sredniaia Azia (Asie Moyenne). Tachkent, SamGU, 1960, p.240 (en russe).

Utilisation nouvelle et originale du pétrole. Matériaux du VI^e congrès interna- tional sur le pétrole (du 19 au 26 juin 1963, Francfort-sur-le-Main) — «Neftékhi- mia», v. III^e, 1963, N.5.

B.V. Vinogradov, A.A. Grigoriev. Guéomorfologuitcheskaia interprétatsia kosmi- tcheskikh izobrajéni zemli. (Interprétation géomorphologique des images cosmiques de la terre) — Guéomorfologuia, 1971, N.1 (en russe).

B.V. Vinogradov, A.A. Grigoriev, V.B. Lipatov. Strouktoura pylynykh bour po dannyyz. TV isobrajéni e ISZ. (Structure des tempêtes de poussière selon les données des images télévisées par satellite. — Rapports de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. v. 205, 1972, N. 4 (en russe).

V.N. Vinogradov. Znatchénié lesnykh mélioratsí pri osvoénii aridnykh territori. (Importance de la bonification forestière lors de la mise en valeur des terres arides). Bulletin de l'Institut National de recherches scientifiques de bonification agraire et forestière. Volgograd, 1961, fasc. 1 (23), p. 3—8 (en russe).

B.V. Vinogradov. Rastitelnyé indicatory. (Indicateurs végétaux). Moscou, 1964.

B.V. Vinogradov. Indikatory opoustynivania i ikh aérokosmitcheski monitoring. (Indicateurs de désertification et leur contrôle aérospatial). — Problémy osvoéniia poustyn, 1980, N.4, p. 14—23.

B.V. Vinogradov, A.A. Grigoriev. Ispolzovanié kosmitcheskikh fotografii dlia izouchéniia ekzoguénnykh form réliéfa. (Utilisation des photographies aérospatiales lors de l'étude des formes exogènes du relief). — Izvestia Vsesoyouznoho Guéografitcheskogo obchtchestva, v. 102, N.6, 1970.

S. Zainoutdinov, K.S. Akhmedov. Poloutchénié iskoussstvennogo strouktouro-obrazovaniia K-4 dlia potchv Srednei Azii. (Obtention de la structuration artificielle K-4 pour les sols de l'Asie Moyenne). — In: Gouminovyé i polimernyé preparaty v selskom khoziaistvé. Tachkent, 1961.

N.T. Zakhariv, I.B. Révout. Zakréplénié podvijnykh peskov bitoumnoi émoulsiéi. (Fixation des sables mouvants par l'émulsion de bitume). — In: Poustyni SSSR i ikh osvoénié, fasc. 2, 1—L, Académie des Sciences de l'U.R.S.S., 1954, p. 449—464.

L.I. Zoubenok. Isparénié na kontinentakh. (L'évaporation sur les continents). Léningrad, Editions Guidrométéoizdat, 1976, p. 264.

Achtnich W., Homeyer B. Protective measures against desertification in oasis farming, as demonstrated by the example of the Oasis Al Hassa, Saudi Arabia. In: Desertification in Extremely Arid Environments. Stuttgarter Geographische Studien, Band 95, 1980.

Adam O. Feststoffveladence Luftstromung koher Geschwindigketn. Chemie-Ingenieur-Technik. B. 29, H.3, 1957.

Balba A.M. Desertification in North Africa. In: Desertification and Soils Policy. Symposia papers III, 12th International Congress of Soil Science. India, 1982.

Bielfeldt H., Gaebner K. Wirtschaftlich verfahren Zur Betestrgung von Boschungstlachen — Bitumen, 1965, Bd. 28, H.4.

The Blooming Desert. Karapenar, 1981.

Breed C.S., et al. Regional studies of sand seas using Landsat (ERTS) imagery U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 1979, N. 1052, p. 305—307.

Brown G.F. Geomorphology of Western and Central Saudi Arabia. — Rept. 21th Session, Intern. Geol. Congress, Copenhagen, 1960.

China combating desertification. Conference on Desertification, 1977, Nairobi, Kenya.

Clos-Arceduc A. Essai d'explication des formes dunaires sahariennes. — Etudes des photo-interprétations, 1969, N.4.

Combating desertification in China. UNEP Reports and Proceedings. Series 3, 1981.

Conservation Resources in Iran. Imperial Government of Iran, 1977.

Desertification control experience in Libya. Nairobi, 1977.

Desertification map of the World. FAO—UNESCO, 1977.

Fixation des Dunes, protection des niveaux et des sols dans RS de la Grande côte Sénégal. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, 1981.

- Fryrear D.W., Viegand C.L.* Evaluating wind erosion from aerial photographs. *Trans. ASAE*, v. 17, 1974, N.5, p. 892--894.
- Gabriels D., De Boodt M., Minyauw D.* Dune sand stabilization with synthetic soil conditioners; A laboratory experiment — *Soil Sci.*, 1974, vol. 112, N.5.
- Hagedorn H. et al.* Dune stabilization. A Survey of Literature on Dune Formation and Dune Stabilization. Geographisches Institute Universität Würzburg. Aug. 1977.
- Heathland and sand dune afforestation, FAO/DANIDA, FAO, 1974.
- Hovis W.A., Blaine L.R., Callahan W.R.* Infrared aircraft spectra over desert terrain. — *Appl. Optics*, vol. 7, 1968, N.6, p. 1137--1140.
- Iran changing the past into a future. Imperial Government of Iran Ministry of Agriculture and Rural Development, 1977.
- Jensen A.M.* A review of some dune afforestation procedures. In: Conservation in Arid and Semi-Arid Zones. FAO Conservation Guide 3, 1976.
- Kosok P.* Life, land and water in ancient Peru, N.Y., 1965.
- Kingdom of Saudi Arabia. Geographical map (B), Geological map (A). Scale 1: 500000. Prepared by the U.S. Geological Survey and the Arabia American Oil Co. Washington, 1956--1964.
- Kolm K.E.* ERTS MSS imagery applied to mapping and economic evaluation of sand dunes in Wyoming. — *Contributions Geology*, vol. 12, 1973, N.2, p. 69--76.
- Lamprey H.* The Integrated Project on Arid Lands (IPAL). — *Nature and Resources*, vol. 14, N.4, 1978, p. 2--11.
- Le Houerou H.N.* Can desertification be halted? In: Conservation in Arid and Semi-Arid Zones. FAO Conservation Guide 3, 1976.
- Le Houerou H.N.* The nature and causes of desertification. Boulder Westview Press, 1977, p. 17--38.
- Letey J.D., E. Halsey A.F. van Maren, Richardson W.F.* Wind erosion on control with chemical Spraiscalif. *Agr.*, 1963, vol. 17, N.10.
- Lychagin V.M.* Groundwater Pilot Scheme in New Valley. Egypt. Working Document No. 3, Protection of the Pilot Area Against Sand. UNDP/FAO, Dec. 1975.
- Mabbutt J.A.* Aeolian landforms in Central Australia. — *Geogr. Stud.*, vol. VI, N.2, 1968.
- Madigan C.Th.* Central Australian sand ridgy desert. *Geogr. Rev.*, vol. 26, N.2, 1936.
- Mainguet M.* Etude géodynamique de l'effet d'obstacle topographique dans le transport éolien. Résultats obtenus à l'aide d'images aériennes et satellites au Sahara. — *Bull. Soc. Fr. Photogramm.*, 1976, N.16, p. 31--38.
- Mainguet M., Callot Y., Guy M.* Photo-interprétation. 1974, N.2, fasc. 6.
- Mechelein W.* Saharan oases in crisis. In: Desertification in Extremely Arid Environments. Stuttgarter Geographische Studien, Band 95, 1980.
- McKee E.D., Breed C.S.* An investigation of major sand seas in desert areas throughout the world. Third ERTS Symposium G 6, 1974, p. 665.
- Miknam F. and Ahranjani B.* Dunes and development of Iran Ministry of Agriculture. Natural Resources. Forestry and Range organization, 1976.
- Muthana K.D.* Role of forestry in sand dune stabilization. In: Desert Ecosystem and its Improvement. CAZRI Monograph N.1, 1977, p. 273--284.
- Problems and prospects of desertification control in the ESCAP Region.* UNEP/ESCAP, Bangkok, 1983.
- Rasmussen G.* Sandstorm effects on arable land as seen on air photos. — *Lund Studies Geography*, ser. C, 1962, N.3.

Sahel Green Belt Transnational project. UNCOD, A/Conf. 74/29, 1977.

Transnational Green Belt in North Africa. UNCOD. A/Conf. 74/25, 1977.

Transnational project on management of livestock and rangelands to combat desertification in the Sudano-Sahelian regions. UN Conference on Desertification. Nairobi, 1977.

Verstappen Th. H., van Zuidam R.A. Orbital photography and the geosciences: a geomorphological example from the central Sahara. — *Geoforum*, vol. 2, 1970.

Principaux végétaux fixateurs de sable des déserts et des semi-déserts des pays étrangers

Asie Centrale	Inde et Pakistan	Afrique du Nord et Proche-Orient	Afrique du Sud	Australie	Amérique du Nord et Mexique	Amérique du Sud
Populus simonii	Prosopis spiciigera	Pinus pinaster	Arbres Eucalyptus gomphocephala	Acacia aneura	Prosopis juliflora	Prosopis argentina
P. cupidata	P. juliflora	P. halepensis	Casuarina equisetifolia	Eucalyptus gomphocephala		P. strombulifera
P. bolleana	P. glandulosa	P. pinea	Pinus pinaster	Casuarina equisetifolia		P. tamarugo
Elaeagnus moutc- roftii	Acacia senegal	P. brutia		Banksia integrifolia		P. chilensis
E. angustifolia	A. mollissima	Acacia arabica				
Ulmus pumila	A. tortilis	A. senegal				
	A. arabica	A. horrida				
	Salvadora oleoides	Eucalyptus gomphocephala				
	Zizyphus nummularia	E. camaldulensis				
	Balanites roxburghii	Tamarix articulata				
	Gymnospora mon- tana	T. aphylla				
	Casuarina equisetifolia	Casuarina equisetifolia				
	Calophyllum inophyllum	Cupressas semprevirens				
	Tamarix articulata	C. arizonica				
	T. aphylla	Conocarpus lancipilis				
		Haloxylon amm-dendron				

C. biflorus	Aristida obtusa	Aygyphyllum stap- fu	Pennisetum clandestinum	Ammophila reana- ria	Pennisetum chinese
Arundo donax	A. pennata	Aristida kalaharien- sis	Senecio crassiflo- rus	A. brevislegulata	Hyalis argentea
Agropyrum elon- gatum	A. pungens	A. brevifolia	Carpobrotus aequi- latorus	Andropogon scopu- rius	
Ehrharta brevifolia	Arundo donax	Ammophila arena- ria	Arctotis stoehadi- folia	A. gerardi	
Saccharum sponta- neum	Agropyrum juncea- um	Ehrharta gigantea	Ammophila arena- ria	Bouteloua curtipe- dula	
S. munja	Lotus creticus	Sporobolus pungens	Triodia basediwi	B. gracilis	
Citrullus colocyn- thus	Imperata cyindrica			Calamovittia gigantea	
Panicum antidotale	Pennisetum dichotomum			C. longifolia	
Elionurus hirsutus	Polygonum equise- tiforme			Elymus giganteus	
				E. canadensis	
				Panicum virgatum	
				P. havardii	
				Redfieldia flexuosa	
				Sporobolus flexuo- sus	

Herbes annuelles

Agriophyllum arenari- um	Kochia indica	Salsola praecox	Digitaria sanguina- lis	Canavalia maritima
Pigionium cornutum				
Sitopolepis centiflora				
Salsola praecox				

TABLE DES MATIERES

Préface, par A. Babaev	3
1. Particularités écophysiographiques des déserts du monde	7
1.1. Déserts sableux du monde, par I. Zonn et N. Orlovski	7
1.2. Conditions physiographiques des déserts de l'U.R.S.S. par A. Babaev et N. Orlovski	18
2. Méthodes d'amélioration des sables mouvants	33
2.1. Expérience mondiale de l'amélioration des sables mouvants, par I. Zonn, N. Orlovski et I. Svintsov	33
2.2. Indicateurs de la fixation des sables, par B. Vinogradov	52
2.3. Travaux d'amélioration sylvicole dans les déserts sableux et leur organisation, par I. Svintsov	63
2.4. Protections mécaniques, par R. Zakirov	71
2.5. Méthodes physico-chimiques de fixation des sables mouvants, par A. Babaev et B. Nouriev	77
2.6. Phytoamélioration des sables mouvants, par A. Ovezliev et I. Svintsov	86
3. Organisation des études et des actions pratiques en matière de la phytoamélioration des sables mouvants	90
3.1. Etude de la déflation et du transport de sable, par I. Svintsov et V. Tchérédnitchenko	90
3.2. Méthodes mathématiques de calcul de la quantité de sable transporté, par R. Zakirov	103
3.3. Etude de la dynamique du régime des eaux, par E. Svintsova	115
3.4. Etudes pédologiques dans le cadre de la phytoamélioration des terres, par S. Sanine	123
3.5. Techniques de fixation des surfaces sableuses, par A. Ovezliev et I. Svintsov	127
3.6. Techniques du boisement de protection, par A. Ovezliev et I. Svintsov	130
3.7. Protection des ouvrages d'intérêt économique contre l'ensablement et la déflation, par V. Tchérédnitchenko	136
Conclusion, par N. Orlovski	147
Bibliographie	150
Annexe	157