

Canadian Journal of Botany

Journal canadien de botanique

**Contribution à l'étude écologique des dunes
mobiles. II. Les conditions édaphiques**

GISÈLE LAMOUREUX ET MIROSLAV M. GRANDTNER

Volume 56 • Number 7 • 1978

Pages 818–832



National Research
Council Canada

Conseil national
de recherches Canada

Contribution à l'étude écologique des dunes mobiles. II. Les conditions édaphiques

GISÈLE LAMOUREUX¹ ET MIROSLAV M. GRANDTNER

Département d'écologie et de pédologie, Faculté de foresterie et de géodésie, Université Laval, Québec (Qué.), Canada

Reçu le 7 septembre 1977

LAMOUREUX, G., et M. M. GRANDTNER. 1978. Contribution à l'étude écologique des dunes mobiles. II. Les conditions édaphiques. *Can. J. Bot.* 56: 818-832.

Les auteurs ont étudié et classifié les sols des neuf éléments phytosociologiques décrits dans un article précédent (Lamoureux, G., et M. M. Grandtner. 1977. Contribution à l'étude écologique des dunes mobiles. I. Les éléments phytosociologiques. *Can. J. Bot.* 55: 158-171.). Les résultats de l'analyse physico-chimique ont servi à comparer statistiquement les sols des différents éléments phytosociologiques, dans le but de les caractériser et de trouver les facteurs déterminant la distribution des éléments phytosociologiques sur la dune mobile à ammophile. Certaines tendances de la pédogénèse ont pu être discernées mais, au niveau des sols, le passage d'un élément phytosociologique à l'autre est peu marqué.

LAMOUREUX, G., and M. M. GRANDTNER. 1978. Contribution à l'étude écologique des dunes mobiles. II. Les conditions édaphiques. *Can. J. Bot.* 56: 818-832.

The authors have studied and classified the soils of the nine phytosociological elements described in a previous article (Lamoureux, G., and M. M. Grandtner. 1977. Contribution à l'étude écologique des dunes mobiles. I. Les éléments phytosociologiques. *Can. J. Bot.* 55: 158-171.). The results of the physicochemical analysis have been used to compare the soils of the different phytosociological elements statistically to characterize them and to find the factors which determine the distribution of the phytosociological elements on the mobile dune with ammophila. A number of pedogenetic trends could be recognized, but at the soil level, the passage from one phytosociological element to another is little marked.

Introduction

Dans un premier article (Lamoureux et Grandtner 1977), nous avons étudié l'organisation phytosociologique d'un système de dunes mobiles aux Iles-de-la-Madeleine. A partir de la côte vers l'intérieur, nous y avons reconnu une toposéquence marquée, composée de neuf éléments phytosociologiques disposés, la plupart du temps, en zones parallèles. Pour chacun de ces éléments, nous avons étudié plus particulièrement la stratification verticale aérienne et souterraine, la composition floristique et la distribution écologique.

Mais quelles sont les lois qui régissent l'organisation spatiale d'un tel système de dunes mobiles? Y a-t-il, par exemple, un lien entre l'organisation phytosociologique de cette toposéquence et les conditions édaphiques du système dunaire? Jusqu'à quel point la présence d'un élément phytosociologique à tel endroit de la toposéquence est-elle reliée aux conditions physique ou chimiques du sol sous-jacent?

A première vue, mises à part certaines petites particularités, les sols des dunes mobiles semblent uniformes: il n'y a généralement pas d'horizons

pédologiques et c'est du sable partout. Il faut donc s'en remettre aux analyses physiques et chimiques pour détecter des différences, s'il y en a. A partir des résultats de l'analyse des sols, est-il possible, statistiquement, de distinguer des horizons pédologiques dans chacun des profils: le sable à la surface du profil présente-t-il les mêmes caractéristiques que le sable à un mètre de profondeur? D'autre part, il est à prévoir que les analyses de sol révéleront des différences entre les profils. En groupant les profils sur la base de leur appartenance à un élément phytosociologique, trouverons-nous des différences statistiquement significatives entre chaque groupe ainsi formé? Autrement dit: nous avons décrit neuf éléments phytosociologiques bien différenciés, les sols qui leur correspondent sont-ils aussi bien différenciés? Peut-on par cette voie déceler une relation sol-végétation sur la dune mobile?

C'est à ces questions que nous tenterons de répondre dans ce deuxième article. Afin de mieux comprendre l'évolution des sols dans un tel habitat, nous avons inclus dans notre étude une analyse des sols de la plage adjacente aux dunes mobiles.

Méthodes

Échantillonnage

Dans chaque place-échantillon de végétation, ainsi qu'en trois points de la plage pour chacun des 10 transects effectués (La-

¹Adresse actuelle: 2720, petit rang Sainte-Catherine, Saint-Cuthbert (Qué.), Canada J0K 2C0.

moureux et Grandtner 1977, Fig. 2), le sol a été creusé jusqu'à la nappe phréatique ou à une profondeur de 1 m au maximum. Des échantillons ont été prélevés dans chaque horizon du profil, lorsqu'ils existaient, ou dans les couches arbitrairement déterminées comme suit: 0–15 cm, 15–30 cm, 30–45 cm, 45–60 cm, 60–100 cm. L'humidité de chaque horizon a été déterminée au moyen de l'échelle suivante: (1) très sec; (2) sec (humidité insuffisante pour provoquer l'adhérence des particules entre elles lorsqu'on presse l'échantillon de sol dans la main); (3) moyennement humide (adhérence des particules entre elles lorsqu'on presse l'échantillon de sol dans la main); (4) humide (l'eau suinte lorsqu'on presse l'échantillon de sol dans la main); (5) très humide ou mouilleux (nappe phréatique présente). Nous avons également prélevé l'eau de la nappe phréatique pour en mesurer la conductivité. L'analyse des quelque 500 échantillons s'avérant trop longue, 5 profils parmi les 10 de chacune des 11 unités d'échantillonnage (trois points de la plage et les éléments phytosociologiques) ont été choisis au hasard, ce qui porte à 244 le nombre d'échantillons analysés. Seulement 2 des 4 profils de l'élément à *Cakile* ont été étudiés et les résultats n'ont pu être analysés statistiquement.

Dans une étude précédente, l'un des auteurs (Grandtner, non publié) a déterminé que les sables de diverses dunes des Iles-de-la-Madeleine ne contiennent que des traces d'azote, de carbone et de phosphore; nous ne nous sommes par conséquent pas attardés davantage au dosage de ces éléments. Suivant les principes de la fertilité des sols (Fried et Broeshart 1967) nous avons plutôt pris pour acquis qu'une même espèce végétale, l'ammophile, présente dans tous les éléments étudiés, pourra éventuellement refléter par la composition chimique de ses propres tissus, les différences dans la composition du substrat. Il existe maints facteurs intrinsèques ou extrinsèques pouvant modifier la nature chimique de la plante et ce n'est qu'en ayant constamment cette idée à l'esprit qu'il faudra interpréter les résultats de l'analyse foliaire en rapport avec la composition du substrat. L'échantillonnage des feuilles d'ammophile a été effectué au cours de l'été 1969; on a prélevé deux ou trois touffes dans neuf stations le long d'un transect (voir Fig. 2 pour la localisation et la liste de ces stations). Les feuilles, échantillonnées au-dessus de la gaine, sur des plants végétatifs, furent d'abord séchées sous presse, puis à l'étuve, et finalement broyées comme suggéré par Amiot et Bernier (1962).

Analyses chimiques

Les sables, séchés à l'air, ont d'abord été tamisés à 2 mm afin d'enlever les galets, les débris de coquillages et de racines. Le pourcentage d'éléments ainsi éliminés étant généralement inférieur à 1% du poids, il n'en fut pas tenu compte dans l'analyse de la texture.

Les méthodes d'analyse des sols et d'analyses foliaires furent celles couramment utilisées dans les laboratoires du Département d'écologie et de pédologie de l'Université Laval. Les procédures sont, pour la plupart, décrites dans Amiot et Bernier (1962) ou dans Robitaille (1968). En voici un bref aperçu: la texture a été déterminée par le tamisage de 10 g de sable pendant 10 min dans trois tamis superposés ayant des mailles de 0.42 mm, 0.25 mm et 0.105 mm; la capacité d'échange cationique (CEC) par la méthode de Schollenberger et Simon (cité par Amiot et Bernier (1962)); le pH avec le pH-mètre Zeromatic de Beckman dans une suspension sol-eau (1:1), agitée et reposée 1 h. Les mesures de conductivité ont été effectuées avec un 'conductimètre' de Radiometer (Copenhague) sur échantillons de la nappe phréatique et des extraits du sol en suivant les instructions du Soil Survey Staff (1962) des États-Unis. Les cations échangeables (K, Na, Mg, Ca) ont été extraits par percolation à l'acétate d'ammonium (pH 7.0), dans le cas des sols, et par solution aqueuse des cendres provenant d'une combustion

sèche, dans le cas des feuilles. Le dosage, dans les deux cas, fut effectuée au spectrophotomètre à absorption atomique Parkin-Elmer modèle 303. Pour l'azote, la méthode de Cole et Parks (citée par Amiot et Bernier (1962)) a été utilisée. Le phosphore des tissus végétaux a été déterminé par la méthode à l'acide phospho-vanado-molybdique (Amiot et Bernier 1962) après destruction de la matière organique au moyen de HNO₃ et HClO₄. Enfin, le pourcentage de cendres a été obtenu par ignition, comme suggéré par Amiot et Bernier (1962).

Analyses statistiques

Afin de comparer entre eux les sols de la plage et des éléments phytosociologiques, divers tests statistiques ont été appliqués aux résultats de l'analyse des sols.

Il convenait d'abord de s'assurer de l'opportunité des divisions arbitraires en 'horizons' utilisées lors de l'échantillonnage de chacun des profils de sol. Des tests d'analyse de variance à un critère de classification (Dixon et Massey 1957) furent appliqués aux résultats de l'analyse de pH, de la granulométrie et de la conductivité pour chacune des unités d'échantillonnage étudiées. Les conclusions de ces tests furent acceptées malgré les différences très significatives entre les variances de certains horizons de quelques unités d'échantillonnage dans le cas de la conductivité.

A la suite de ces tests, nous avons considéré les horizons arbitraires de chacun des profils comme des répétitions et envisagé chaque unité d'échantillonnage comme une population statistique. Les moyennes des échantillons des populations statistiques furent comparées au moyen de tests d'analyse de variance à un critère de classification, ou des tests de signification de la différence entre deux valeurs moyennes (Dixon et Massey 1957) selon les cas, et des tests de rapport de variance.

Dans le cas des tests effectués sur les moyennes, le seuil de probabilité fut fixé à 0.05 et, étant donné le robustesse de ces tests, le seuil de probabilité des tests du rapport de variance correspondants à 0.01.

Résultats et discussion²

Profondeur et couleur

Seule la couche superficielle du dépôt (premiers 100 cm) a été analysée, mais des coupes dans les caoudeyres montrent qu'à certains endroits l'accumulation de sable peut atteindre 3–10 m, au-dessus de la nappe phréatique; c'est dire l'importance de la couche de rhizomes de l'ammophile qui constitue en quelque sorte l'infrastructure de la dune.

La couche superficielle de sable sec, qui varie en épaisseur de 0 (en particulier au fond des caoudeyres) à 8 cm, présente différentes teintes de gris,³ toujours très pâles. L'eau du sol confère ensuite au sable des teintes légèrement ou nettement plus foncées (Soil Survey Staff 1962), allant du brun gris au brun jaune foncé, en passant par différents bruns. Notons dès maintenant certains horizons particuliers: (1) des stries variant du gris foncé au noir, que

²Plus de détails concernant les analyses chimiques et les analyses statistiques ainsi que de nombreuses photos des phénomènes observés sur le terrain apparaissent dans Lamoureux (1973).

³Les couleurs furent notées sur le terrain, d'après le code numérique du système Munsell (Munsell Soil Color Charts 1954).

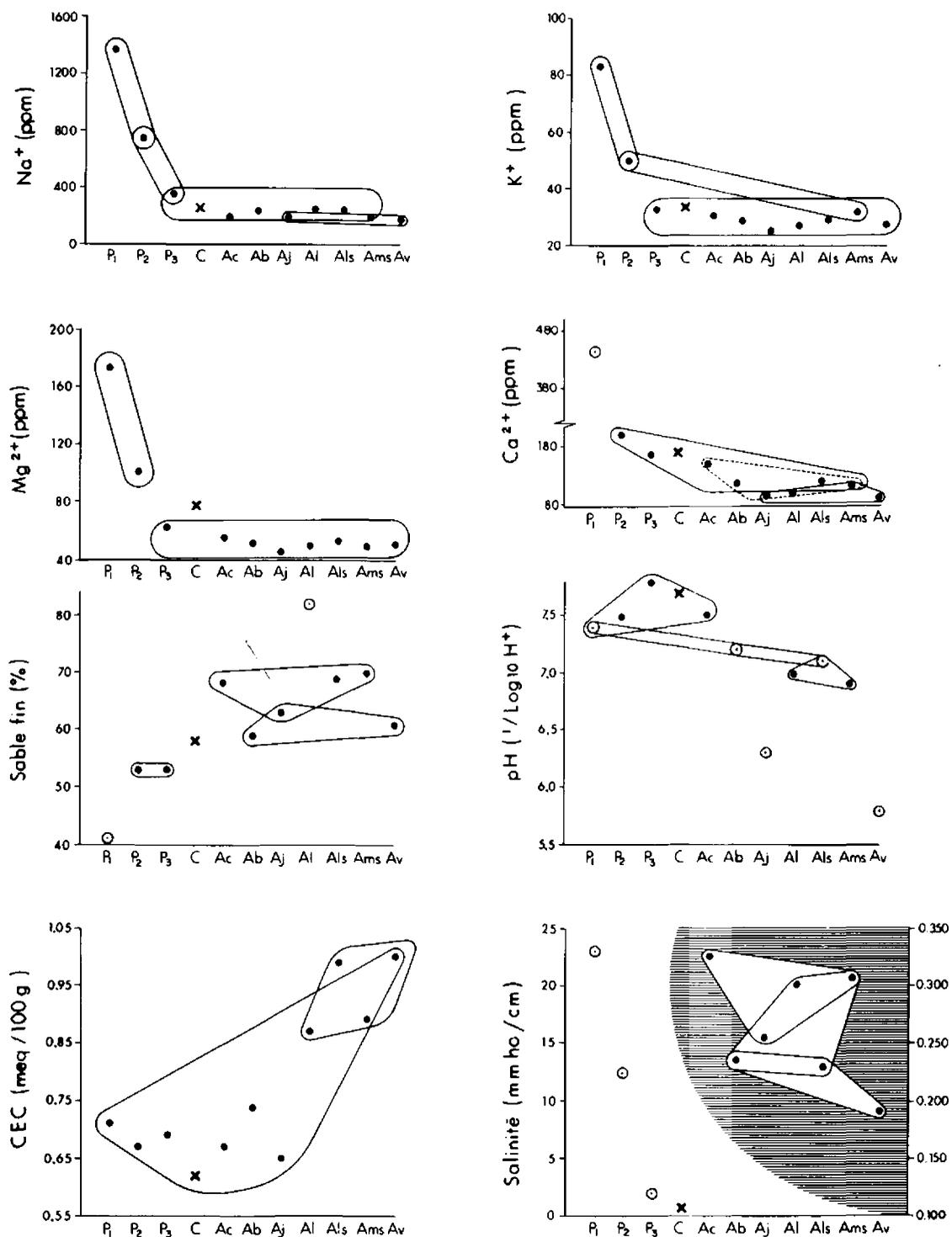
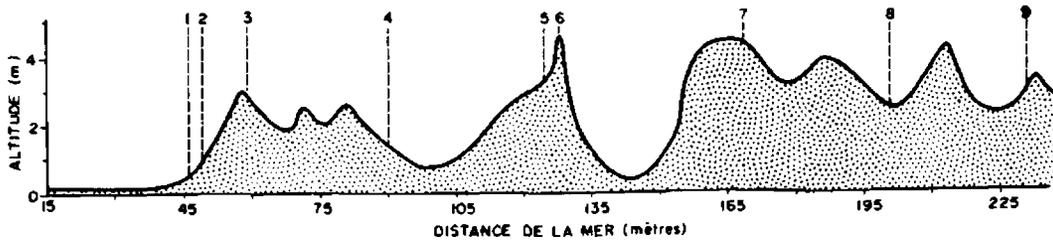
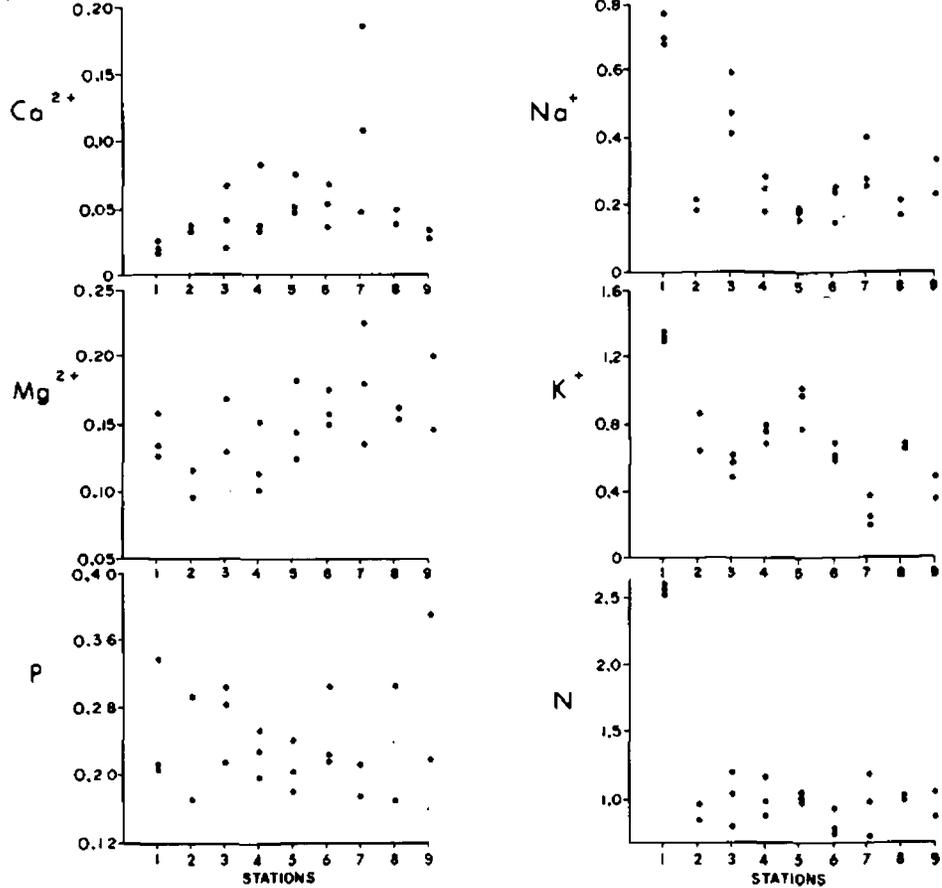


FIG. 1. Valeurs moyennes des résultats de l'analyse des sols (Les Sillons, Iles de-la-Madeleine). Les différentes figures géométriques correspondent à autant de populations statistiques. Abréviations: P₁, plage 1; P₂, plage 2; P₃, plage 3; C, élément à *Cakile*; Ac, élément à *Ammophila-Cakile*; Ab, élément à *Ammophila*; Aj, élément à *Ammophila-Juncus*; Al, élément à *Ammophila-Lathyrus*; Als, élément à *Ammophila-Lathyrus-Smilacina*; Ams, élément à *Ammophila-Myrica-Smilacina*; Av, élément à *Ammophila-Vaccinium*; x, moyenne exclue de l'analyse statistique.

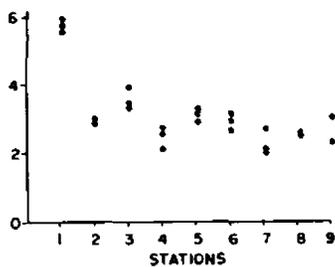
a) Localisation des stations



b) Concentrations des ions et éléments (%)



c) Pourcentage de cendres



1	premiers plants d' <i>Ammophila breviligulata</i>	
2	élément à <i>Ammophila</i> - <i>Cakile</i>	Ac
3	élément à <i>Ammophila</i> (dense)	Ab
4	élément à <i>Ammophila</i> - <i>Myrica</i>	Am
5	élément à <i>Ammophila</i> - <i>Lathyrus</i>	Al
6	élément à <i>Ammophila</i> (très ouvert)	Ab
7	élément à <i>Ammophila</i> - <i>Lathyrus</i> - <i>Smilacina</i>	Als
8	transition dune mobile - dune fixée	
9	lande	

FIG. 2. Résultats des analyses foliaires de l'*Ammophila breviligulata* (Les Sillons, Iles-de-la-Madeleine).

TABLEAU 1. Valeurs moyennes des caractères édaphiques de la plage et des éléments phytosociologiques des dunes mobiles (Les Sillons, Iles-de-la-Madeleine)

Caractères	Stations										
	P1	P2	P3	C	Ac	Ab	Aj	Al	Als	Ams	Av
Sable fin (%)	40	53	53	58	68	59	63	82	69	70	61
CEC (meq/100 g)	0.71	0.67	0.69	0.62	0.67	0.74	0.65	0.87	0.99	0.89	1.00
pH	7.4	7.5	7.8	7.7	7.5	7.2	6.3	7.0	7.1	6.9	5.8
Conductivité (mmho/cm)	23.3	12.6	1.98	0.937	0.326	0.236	0.256	0.301	0.230	0.305	0.191
K ⁺ (ppm)	83	50	33	33	31	29	26	27	29	32	28
Na ²⁺ (ppm)	1381	751	372	275	228	246	205	223	235	211	180
Mg ²⁺ (ppm)	174	100	62	78	55	50	45	49	53	48	50
Ca ²⁺ (ppm)	447	203	165	165	152	119	87	95	114	105	83

NOTE: P1, plage 1; P2, plage 2; P3, plage 3; C, élément à *Cakile*; Ac, élément à *Ammophila-Cakile*; Ab, élément à *Ammophila*; Aj, élément à *Ammophila-Juncus*; Al, élément à *Ammophila-Lathyrus*; Als, élément à *Ammophila-Lathyrus-Smilacina*; Ams, élément à *Ammophila-Myrica-Smilacina*; Av, élément à *Ammophila-Vaccinium*; CEC, capacité d'échange cationique.

l'on trouve en particulier sur le haut de plage, généralement minces (3–5 mm ou 15 mm au maximum) et discontinues; (2) des paléohumus, enfouis sous une couche plus ou moins épaisse de sable, sous lesquels on trouve à l'occasion un horizon Ae de différentes teintes de gris et exceptionnellement un horizon brun vif, brun rouge clair ou même rouge jaune, vraisemblablement un horizon B; (3) des mouchetures et des horizons glyifiés de couleur rouge jaune, brun foncé ou brun jaune, dans certains profils de fond de caoudeyre.

Texture et structure

Le sable, résultant de l'action de la mer sur les grès du Permo-Carbonifère (Falaise 1954; Sanschagrín 1964; Grandtner 1967; Brisebois 1972), constitue le substrat unique de la végétation des dunes mobiles des Sillons. Quelques échantillons provenant de diverses dunes ou plages des Iles-de-la-Madeleine ont montré qu'il est presque entièrement constitué de quartz: 90% sont des grains de quartz pur (SiO₂) ou enrobés d'une fine pellicule d'hématite, alors que 10% sont des grains noirs ferromagnésiens (pyroxène ou magnétite) (Falaise 1954; Dumont et Hamelin 1959; Sanschagrín 1964; Brisebois 1972).

Le processus de formation de dunes de sable est fort complexe; on en trouvera diverses explications dans Davis (1957), Guilcher (1958), Ottman (1965) et Guimont et Laverdière (1975).

La dimension des particules de sable jouant un rôle important dans la formation et le dynamisme général des dunes, de nombreux auteurs se sont attardés à en faire l'analyse granulométrique. En ce qui concerne le pourcentage du sable fin, il varie, en général, de 0 (Comporta, Portugal (Salisbury 1952, p. 162)) à 70 (Newborough Warren, Angleterre (Ranwell 1959, p. 585)).

D'après nos analyses (Tableau 1), le sable des Sillons comporte plus de sable fin que celui de la

plupart des ammophilaies d'Europe. Quant aux résultats cités pour les Iles-de-la-Madeleine par d'autres auteurs, leur non-concordance s'explique si les échantillons de Dumont et Hamelin (1959) et de Sanschagrín (1964) ont été prélevés sur la plage, à moins que la composition granulométrique des dunes ne varie considérablement d'un endroit à l'autre du petit territoire que constitue l'archipel.

Les fractions extrêmes (sable très fin et sable grossier) de l'analyse granulométrique des sables⁴ étant généralement très faibles,⁵ elles ont été additionnées aux catégories adjacentes, sables moyens (2–0.25 mm) et sables fins (<0.25 mm) pour l'analyse statistique. Quant à la proportion des particules de dimension supérieure à 2 mm (débris de coquillages, fragments de racines, débris organiques divers) elle est partout négligeable. Dans l'ensemble, les résultats obtenus indiquent que le substrat de ces plages et dunes est constitué de sable fin tel que défini précédemment, à l'exception du substrat de la plage 1 qui est un sable moyen.

L'analyse de variance permet d'affirmer qu'il n'y a pas de différence de texture entre les horizons arbitraires des profils étudiés. Il est évident que la dimension des particules de ces sables constamment remaniés varie dans un profil, et parfois beaucoup, mais d'une façon désordonnée; chaque profil peut ainsi être considéré comme une seule population statistique.

Les résultats de l'analyse statistique des données

⁴La classification du National Soil Survey Committee (1970, p. 217) fut légèrement modifiée selon les tamis disponibles: sable très grossier et grossier, 2.0–0.42 mm (plutôt que 2–0.5); sable moyen, 0.42–0.25 mm (plutôt que 0.5–0.25); sable fin, 0.25–0.105 mm (plutôt que 0.25–0.10); sable très fin, moins de 0.105 mm.

⁵Le pourcentage de sable très fin n'excède en aucun cas 1.7 alors que celui des sables grossiers atteint occasionnellement 3 ou 4% (17% dans un seul cas).

de la texture révèlent l'existence de cinq populations statistiques (Fig. 1).

Dans la zone intertidale, la mer dépose d'abord les sables plus grossiers, entraînant les sables fins sur le haut de la plage, dans la zone de l'élément à *Cakile*. Le vent à son tour entre en jeu, balaie la plage de ses éléments les plus fins et les dépose temporairement au pied du premier obstacle entravant sa course: les touffes d'ammophile du flanc de la première dune (zone de l'élément à *Ammophila-Cakile*) Les éléments à *Ammophila-Cakile*, à *Ammophila-Lathyrus-Smilacina*, à *Ammophila-Myrica-milacina*, auxquels on peut ajouter celui à *Ammophila-Lathyrus* présentent les plus forts pourcentages de sable fin: soit qu'ils occupent des sites très exposés faisant obstacle au vent, soit qu'ils se situent aux abords immédiats des grandes caoudeyres où le vent doit déposer les sables qu'il vient d'arracher, soit que le couvert végétal soit plus dense ou que les espèces présentes retiennent mieux les particules de sable.

D'autre part, les éléments à *Ammophila* et à *Ammophila-Vaccinium* présentent un pourcentage moindre de sable fin, soit que la position topographique et le couvert végétal trop dispersé favorisent le prélèvement des particules fines par le vent, soit qu'à cause de l'éloignement de la mer ou du couvert végétal plus dense, le vent exerce une action amoindrie et n'apporte pratiquement plus de sable fin (cas des dunes éloignées). L'élément à *Ammophila-Juncus*, caractéristique des fonds de caoudeyres, se rattache autant à l'une qu'à l'autre des deux dernières catégories.

Ainsi, la dimension des particules de sable en un lieu donné n'est vraisemblablement pas uniquement fonction de l'éloignement de la mer mais dépend également et en bonne partie de l'ensemble relief-vent, de la densité du couvert végétal et des espèces qui le composent.

Quant à la structure des sols étudiés, elle est uniformément particulière dans tous les profils observés.

Eau du sol

On croit généralement que les sols des dunes mobiles sont secs, ce qui est vrai pour la partie superficielle du sol: les premiers 5 cm sont asséchés par le vent et le soleil, et jusqu'à 15 ou 30 cm le drainage est rapide et le profil est normalement sec (classe 2). Mais au-delà, l'ensemble du profil devient moyennement humide (classe 3). Sur la plage et au fond des caoudeyres, le sol est moyennement humide en surface puis très humide (classe 5): la nappe phréatique se situe à peu de distance de la surface. La profondeur de la nappe phréatique est indiquée au Tableau 2 pour les profils de la plage et,

TABLEAU 2. Quelques caractères écologiques de la plage (Les Sillons, Iles-de-la-Madeleine)

	Zone de la plage																											
	Plage 1					Plage 2					Plage 3																	
No du relevé	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
No de la fiche	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76
Numéro du transect	30	22	14	04	48	55	64	70	10	5	4	3	2	1	6	7	8	9	10	9	6	7	6	1	2	3	4	5
Proximité de la mer (m)	4.5	2	5	2	1	4	3	3	16	12.5	16.5	15.5	27.5	13	15	21	11	18.5	42.5	27.5	24.5	41	24	29.5	44	32.5	45	36.5
Altitude (dim)	-3	-2	-2	-3	-5	-2	-3	-5	-2	-2	-2	-1	-2	-2	-3	-2	-3	-2	-2	0	0	0	2	0	-2	0	3	2
Pente (°)	6	5	8	9	-	4	7	6	2	3	2	0	1	1	2	3	2	4	3	6	10	5	4	4	0	4	3	4
Exposition	se	se	sse	se	-	sse	s	sse	no	no	se	-	no	no	no	n	sse	se	sse	s	sse	se	sse	-	se	se	se	
pH en surface ^a	(8)	7.6	7.7	7.7	8	-	7.3	(8)	7.6	7.2	(8.2)	7.9	(8)	7.4	7.7	-	(6.5)	-	(6.5)	7.1	7.8	-	7.5	7.5	7.4	(6.5)	(6.5)	
Sables (nombre d'horizons striés)	25	50	42	62	29	17	24	12	40	37	47	57	35	95	30	55	42	72	42	85	85	70	47	52	52	67	70	62
Profondeur de la nappe phréatique (cm)	4	3/4	3/4	4/5	4	4	4	4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
Classe d'humidité																												

^aLes valeurs du pH en surface entre parenthèses indiquent que la mesure fut prise sur le terrain uniquement, par la méthode Hellige-Truog.

dans Lamoureux et Grandtner (1977, au Tableau 2) pour les profils des éléments phytosociologiques.

Conard (1935, p. 465) observe également: "*Five cm below the surface this soil is always moist. The xerophytic characters of all the plants are not attributable to lack of available water.*" Pour leur part, Molinier *et al.* (1964, p. 65), à la suite d'une étude des humidités comparées des sols de dunes, affirment que le sol de l'*Ammophiletum* est le plus sec. Oosting et Billings (1942, p. 135) observent, pour des sols analogues: "*No correlation is apparent between the vegetational zonation and any soil moisture factor between the surface and a depth of 20 cm.*" Dans une étude du bilan hydrique de sols de dunes, qui envisage les précipitations, les apports secondaires dus aux condensations (voir aussi Salisbury 1952), les remontées capillaires à partir de la nappe phréatique, l'évaporation et le drainage, Fustec-Mathon *et al.* (1967) affirment d'une part que "la quantité maximum d'eau que le sol sableux peut stocker sous une forme utilisable par unité de poids est toujours très faible ... de l'ordre de 4% dans l'*Ammophiletum* — on sait que cette grandeur est de l'ordre de 10 à 15 pour cent dans les sols limoneux et de 20 pour cent dans les sols argilo-limoneux" (p. 41) et d'autre part "Au niveau des groupements pionniers et de la dune mobile (*Atriplicetum*, *Agropyretum*, *Ammophiletum*), l'alimentation en eau des végétaux paraît être suffisante, les taux d'humidité se maintenant au-dessus du point de flétrissement permanent presque constamment.... L'adaptation des principales espèces est bien davantage liée à la mobilité du substrat et au climat externe, vent, insolation, embruns salés, etc ... qu'au pédoclimat de ces différents groupements" (p. 51).

Mentionnons cependant que l'élément à *Ammophila-Juncus* est lié à la présence de la nappe phréatique à proximité de la surface du sol. Cette relation mérite une étude plus approfondie et marque une division profonde entre cet élément et les autres éléments de la dune mobile. L'élément appartiendrait plutôt à une sère dont le dynamisme serait régi, en bonne partie, par le niveau de la nappe phréatique, relation déjà exprimée, pour des éléments phytosociologiques équivalents, par Willis *et al.* (1959, pp. 249–251 et 269–272).

Capacité d'échange cationique

La valeur de la capacité d'échange cationique (CEC) est très faible, généralement inférieure à 1.3 meq/100 g et varie ordinairement entre 0.5 et 1 meq/100 g;⁶ Woodhouse et Hanes (1966, p. 29)

⁶Rappelons que la valeur moyenne de la CEC pour des argiles est de 60 meq/100 g et de 260 meq/100 g pour des complexes humiques (Duchaufor 1965, p. 80).

trouvent des valeurs variant entre 0.25 et 0.65 pour les sables des dunes et plages de la Caroline du Nord. C'est dire la faible teneur en argile et en matière organique de ces sols; les plantes qui y croîtront seront forcément des pionnières hautement spécialisées, susceptibles de vivre en association avec des microorganismes capables de suppléer aux déficiences du milieu.

Seul le premier horizon de cinq profils (choisis au hasard) de chacun des éléments a été analysé, les analyses statistiques des résultats concernant le pH, la salinité et la granulométrie ayant suffisamment démontré l'absence de différence entre les horizons arbitrairement délimités dans chacun des profils. Les résultats apparaissent au Tableau 1.

Les résultats de l'analyse statistique des données de la CEC révèlent deux populations statistiques (Fig. 1): (1) tous les éléments à l'exception de celui à *Ammophila-Lathyrus-Smilacina*; (2) les éléments à *Ammophila-Lathyrus-Smilacina*, à *Ammophila-Lathyrus*, à *Ammophila-Myrica-Smilacina*, à *Ammophila-Vaccinium*.

La population statistique 2 regroupe les éléments phytosociologiques les plus évolués, à couvert végétal plus dense et plus diversifié. Cependant, la différence entre les deux populations est minime, un seul élément étant exclu de la population. On peut considérer que l'évolution du sol dans le sens de son enrichissement en particules colloïdales, s'effectue lentement, imperceptiblement.

pH

Le pH, indicateur global de l'état du sol, influence de façon directe et indirecte la nutrition des plantes. Ainsi, pour les sols étudiés dans le cadre de ce travail, le pH varie en moyenne entre 5.8 et 7.8 (Tableau 1 et Fig. 1) permettant l'activité microbienne (ammonification, nitrification et décomposition de la cellulose en particulier (Teuscher et Adler 1960, p. 113)) et la disponibilité des éléments nutritifs (Daubemire 1967, p. 47).

Les valeurs de pH mesurées aux Sillons sont, en général, semblables aux valeurs citées pour les États-Unis par Jagschitz et Bell (1966), Woodhouse et Hanes (1966) et Oosting et Billings (1942) et inférieures à celles du Royaume-Uni mentionnées par Robertson et Gimmingham (1951), Ranwell (1959) et Willis *et al.* (1959).

Comme dans le cas de la texture du sol, l'analyse de variance ne révèle aucune différence entre les horizons des profils et chaque profil a été considéré comme une seule population statistique. Les résultats de l'analyse statistiques des données du pH indiquent l'existence de six populations statistiques (Fig. 1).

L'examen de cette figure révèle une tendance à la

diminution de la valeur du pH dans le temps, si l'on considère que la zonation des éléments phytosociologiques correspond à une succession à peu près identique. Cette tendance n'est cependant pas absolue, les relations qui existent entre les éléments des populations statistiques le montrent bien. En effet, il existe une similarité entre l'élément à *Ammophila* et la plage 1 plutôt qu'avec l'élément qui le précède immédiatement et une similarité entre l'élément à *Ammophila* et celui à *Ammophila-Lathyrus-Smilacina*, pourtant probablement plus âgé que l'élément à *Ammophila-Lathyrus*. Enfin, Les éléments phytosociologiques à *Ammophila-Lathyrus*, à *Ammophila-Lathyrus-Smilacina* et à *Ammophila-Myrica-Smilacina*, vraisemblablement d'âges différents, ne forment pourtant qu'une seule population statistique.

Les sols de l'élément à *Ammophila-Juncus* situés au fond des caoudeyres et sous l'influence directe des variations de la nappe phréatique perdent plus facilement les ions calcium et sodium et se distinguent des autres éléments par un pH légèrement acide. En ce qui concerne l'élément à *Ammophila-Vaccinium*, les profils analysés appartiennent à des sols de dunes éloignées, plus vieilles, ce qui expliquerait leur concentration plus faible en calcium et en sodium et leur pH moyennement acide. La présence de matière organique dans quelques profils de l'élément à *Ammophila-Vaccinium* (paléohumus, début de litière en surface) contribue aussi à abaisser le pH de ces sols.

L'acidification lente du substrat, surtout par lessivage des ions calcium et sodium, permet l'installation d'espèces plus oxyphiles, qui accélèrent à leur tour le processus d'acidification; ce facteur n'explique pas complètement la distribution des espèces et des groupements végétaux, d'autres facteurs exercent certainement une action plus limitative, retardant de façon mieux définie la prise de possession progressive du terrain par certaines espèces. Bref, même si on constate une tendance à la diminution de la valeur du pH dans le temps, il est difficile de relier directement la distribution des groupements végétaux de la dune mobile à ce facteur, exception faite des éléments à *Ammophila-Juncus* et à *Ammophila-Vaccinium* qui relèvent tous deux de successions secondaires.

Matière organique

Les seules traces visibles d'accumulation de matière organique dans les sols de dunes mobiles étudiés consistent en minces stries noires et en paléohumus; on note aussi un début de litière sur les sols des éléments à *Ammophila-Myrica*, à *Ammophila-Myrica-Smilacina* et à *Ammophila-Vaccinium*.

Les stries, fréquentes dans les profils de haut de

plage (plage 3) et de l'élément à *Cakile*, occasionnelles dans les profils des éléments à *Ammophila-Cakile* et à *Ammophila*, sont rares dans les autres profils étudiés (voir Tableau 2 et, dans Lamoureux et Grandtner (1977), Tableau 2). On peut imaginer qu'elles proviennent de la décomposition des algues et des zostères que la houle de tempête laisse sur le haut de la plage et qu'un vent violent transporte parfois plus à l'intérieur du système dunaire. La décomposition de ces végétaux serait très rapide, puisque, quelle que soit la profondeur des stries, on ne peut reconnaître à l'œil qu'il s'agit de débris végétaux.

Les paléohumus que l'on trouve surtout dans les profils des dunes mobiles éloignées de la mer, sont enfouis à des profondeurs variables (Lamoureux et Grandtner 1977, Tableau 2). Ils représentent un ancien stade de dune fixée dont la végétation a vraisemblablement été rasée par le feu: on y trouve occasionnellement des débris de charbon de bois et les témoignages des Madelinots le confirment. L'étude de la distribution et de la composition de ces paléohumus, en relation avec les humus de surface de la dune fixée, serait précieuse pour connaître l'âge et le dynamisme des dunes mobiles. Ces paléohumus constituent une source importante d'éléments nutritifs pour les végétaux, en particulier pour le *Vaccinium angustifolium* qui y étale ses racines (voir aussi Waterman 1919).

Les litières sont rudimentaires et constituées de quelques feuilles et brindilles de *Myrica pensylvanica* ou de *Vaccinium angustifolium* et d'*Arctostaphylos uva-ursi* selon le cas et de feuilles d'*Ammophila breviligulata*; c'est sans doute le vent qui empêche l'accumulation des débris végétaux et la formation de véritable litière à la surface des autres éléments des dunes mobiles.

On le voit, les sources de carbone sont minces et on ne sera pas surpris de la difficulté qu'il y a à détecter du carbone dans les sables de dunes. Sur la Dune du Sud, dans une étude précédente non publiée, l'un des auteurs n'en trouve que des traces (<0.01%) à quelques exceptions près (maximum 0.2%) et Robitaille (1968, pp. 59-61) mentionne des valeurs variant entre 0.0 et 3.3%, généralement moins de 1%. Ces résultats correspondent bien à ceux obtenus en France par Géhu (1964, p. 257) et par Fustec-Mathon *et al.* (1967, p. 34) et au Royaume-Uni par Robertson et Gimmingham (1951, p. 403), Ranwell (1959, p. 590) et Willis *et al.* (1959, p. 16).

Les résultats de l'analyse foliaire de l'*Ammophila breviligulata* (Tableau 3 et Fig. 2) ne permettent pas de déceler chez cette espèce de variation significative de la quantité de matière organique en relation avec le milieu. Seules les valeurs obtenues

TABLEAU 3. Pourcentage moyen de cendres et de matière organique contenues dans les feuilles de l'*Ammophila breviligulata* prélevées dans neuf stations le long d'un transect des dunes mobiles (Les Sillons, Iles-de-la-Madeleine)^a

Stations	Cendres	Matière organique
1	5.70	94.30
2 (Ac)	2.92	97.07
3 (Ab)	3.60	96.39
4 (Am)	2.47	97.53
5 (Al)	3.12	96.87
6 (Ab)	2.95	97.04
7 (Als)	2.38	97.62
8	2.64	97.36
9	2.77	97.23

^aLa localisation des stations et la signification des abréviations sont données à la Fig. 2.

pour les premières touffes croissant sur le haut de plage (station 1) se détachent de l'ensemble des données; elles reflètent vraisemblablement une plus grande concentration en sels minéraux imputable à l'apport périodique d'eau de mer.

Somme toute, on peut reprendre la conclusion formulée par Waterman en 1919 (p. 50): "...organic matter is so rare and scattered that as a general factor it is practically negligible."

Salinité

Bien que les sables de la plage présentent des valeurs de conductivité⁷ élevées (Tableau 1), les sels déposés périodiquement par la mer sont très rapidement entraînés, comme en font foi les baisses remarquables de conductivité enregistrées d'une zone à l'autre. D'autre part, si l'on excepte quelques valeurs qui semblent aberrantes (7 sur 189), les sables des éléments phytosociologiques ont une conductivité inférieure à 1 mmho/cm (1 mho = 1 S), variant généralement autour de 0.2 et 0.3 mmho/cm; la conductivité des deux humus analysés (profils no 70 et 72), bien qu'également inférieure à 1 mmho/cm, s'avère toutefois supérieure aux autres horizons des mêmes profils.

La conductivité des eaux de mer pour chacun des transects et de la nappe phréatique des profils qui l'atteignaient à également été mesurée (Tableau 4). Les résultats obtenus, dans l'ensemble, se comparent aux valeurs des sables du même profil; cependant dans le cas de la zone intertidale (plage 1), les valeurs sont à peu près identiques à celles mesurées pour l'eau de mer et par conséquent supérieures

⁷"The conductivity of the saturation extract can be used directly for correlating salinity with plant growth, without conversion or reference to any other scale" (Soil Survey Staff 1962, p. 355).

TABLEAU 4. Comparaison de la conductivité moyenne (mmho/cm) des sables et de la nappe phréatique (Les Sillons, Iles-de-la-Madeleine)^a

Unités d'échantillonnage	Unités					
	Mer	P ₁	P ₂	P ₃	Aj	Al
Sables		23.3	12.6	1.98	0.256	0.585 ^b
Nappe phréatique	31.9	32.4	13.3	1.72	0.204	0.280 ^c

^aLa signification des abréviations est donnée au Tableau 1.

^bMoyenne du profil no 26.

^cUne seule valeur: profil no 26.

aux valeurs mesurées dans les sables du même profil.

Le seuil généralement accepté comme susceptible "to interfere osmotically with the growth of nonhalophytes" est une conductivité de 4 mmho/cm (Daubenmire 1967, p. 52; Soil Survey Staff 1962, p. 356) ou de 0.5% (Stocker, cité par Boyko (1966, p. 25)). Aucune des valeurs de conductivité des sables colonisés par la végétation dans la région à l'étude n'atteint ce seuil; Jagschitz et Bell (1966, p. 20) au Rhode Island, U.S.A., Robertson et Gillingham (1951, p. 400) au Royaume-Uni, Kelley (1925, p. 148) et Kearney, dès 1904, aux Etats-Unis font les mêmes constatations. Les caractères halophytiques de la flore des dunes et de la plage ne peuvent être attribués à la salinité du sol,⁸ observations corroborées par celles de Conard (1935, p. 465), Oosting et Billings (1942, p. 136), Boyce (1954, p. 39), Martin (1959, p. 35) et Alberdi *et al.* (1967, p. 26); il faudrait plutôt en imputer la responsabilité aux sels des embruns⁹ (travaux de: Wells et Shunk 1938; Boyce 1954; Martin 1959) aux concentrations relatives des divers ions dans le substrat (Chapman 1931) ou à d'autres facteurs.

Ici encore on ne peut statistiquement déceler de différence significative entre les horizons et chaque profil est considéré comme une seule population statistique. Les résultats de l'analyse statistique des données de la conductivité révèlent l'existence de six populations statistiques (Fig. 1).

D'une part, les zones de la plage diffèrent significativement les unes des autres et on y remarque une chute prononcée des valeurs de conductivité; d'autre part, concernant les éléments phytosociologiques, on a d'abord le bloc des valeurs moyennes centrales auquel les moyennes extrêmes (éléments à *Ammophila-Cakile* et à *Ammophila-Vaccinium*) sont respectivement reliées. Ces rela-

⁸"Ordinary cultivated soil of the eastern United States generally contains matter readily soluble in water to the amount of 0.02 to 0.2 per cent." (Kearney 1904, p. 435). Les limites de la classe de salinité 0 du Soil Survey Staff (1962, p. 360) sont de 0 à 0.15% de sels ou de 0 à 4 mmohs/cm.

⁹Le terme aéro-halophytes fut proposé par Stocker (cité par Chapman (1942, p. 292)).

tions laissent entrevoir une évolution du sol quant à ce facteur, dans le sens d'une diminution de la salinité avec le temps.

Azote

L'absence de litière véritable explique, pour une bonne part, le peu d'azote mesuré par les techniques conventionnelles. Pour la Dune du Sud, les valeurs suivantes ont été obtenues: (1) traces à 0.01%, Grandtner (non publié); (2) 0-0.01%, Robitaille (1968, p. 61). Les valeurs trouvées pour des sols similaires à l'extérieur du Canada varient entre 0.0017% (Fustec-Mathon *et al.* 1967, p. 34) et 0.020% (Willis *et al.* 1959, p. 16).

Ces valeurs s'avèrent très faibles si on les compare, par exemple à celles des sols de groupement forestiers (1.33%, pour l'horizon A, de l'érablière laurentienne (Grandtner 1966, p. 134)) ou des sols alluviaux de la zone intertidale de l'île d'Orléans (0.13-0.93% (Lacoursière et Grandtner 1971, p. 449)) et les sables de dunes mobiles sont généralement reconnus comme étant déficitaires en azote (Willis et Yemm 1961; Willis 1965; Woodhouse et Hanes 1966). Pourtant, certaines espèces végétales réussissent à y croître; les analyses foliaires de l'*Ammophila breviligulata* indiquent des valeurs variant entre 0.73 et 2.57% d'azote (Jagschitz et Bell (1966, p. 20) en trouvent de 1.3 à 1.8%), et il faut, selon l'état actuel des connaissances, s'en remettre à la fixation atmosphérique de l'azote par des microorganismes pour compléter le bilan de l'azote dans ces conditions. Géhu (1960) et Hassouna et Wareing (1964) ont publié certaines de leurs observations sur la présence et le rôle des *Azotobacters* dans les sables dunaires et la rhizosphère de l'*Ammophila arenaria*.

Les résultats de l'analyse foliaire (Tableau 5, Fig. 2) indiquent une concentration plus élevée en azote dans les feuilles des spécimens les plus proches de la mer. Cette observation pourrait être liée à une concentration en azote également plus forte dans le sol (peut-être due à une plus grande abondance de bactéries, aux laines de marées ou à d'autres facteurs) ou à certains facteurs intrinsèques, plants plus jeunes, plus succulents, etc. Les variations de la concentration en azote dans les autres stations ne semblent pas significativement différents, il faudrait cependant un plus grand nombre d'analyses pour en être certain.

Le phosphore

Les analyses effectuées par Grandtner (non publiées) et par Robitaille (1968) laissent supposer qu'il existe bien peu de phosphore assimilable dans les sables des dunes mobiles de la Dune du Sud. Grandtner mentionne des traces ou des concentra-

TABLEAU 5. Pourcentage moyen d'azote, de phosphore, de potassium, de sodium, de magnésium et de calcium contenus dans les feuilles de l'*Ammophila breviligulata* prélevées dans neuf stations le long d'un transect des dunes mobiles (Les Sillions, Îles-de-la-Madeleine)^a

Station	N	P	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺
1	2.55	0.2510	1.3083	0.7103	0.1414	0.0202
2 (Ac)	0.91	0.2290	0.7467	0.1929	0.1049	0.0336
3 (Ab)	1.02	0.2667	0.5617	0.4908	0.1691	0.4010
4 (Am)	1.01	0.2253	0.7455	0.2022	0.1230	0.0512
5 (Al)	1.03	0.2073	0.9411	0.1728	0.1508	0.0559
6 (Ab)	0.82	0.2507	0.6293	0.2166	0.1638	0.0509
7 (Als)	0.96	0.1710	0.2880	0.3123	0.1805	0.1128
8	1.02	0.2360	0.6643	0.1914	0.1590	0.0416
9	0.96	0.3080	0.4391	0.2786	0.1757	0.0288

^aLa localisation des stations et la signification des abréviations sont données à la Fig. 2.

tions de moins de 5 ppm (occasionnellement entre 5 et 10 ppm), Robitaille trouve de 10 à 25 ppm, toujours sans qu'il soit possible de distinguer des concentrations différentes selon les éléments phytosociologiques. Ces concentrations sont évidemment très faibles si on les compare à celles des sols des groupements forestiers (78 ppm pour l'horizon A, de l'érablière laurentienne (Grandtner 1966, p. 134)).

D'autre part, les travaux de Willis *et al.* (1959), Willis et Yemm (1961) et Willis (1963, 1965), démontrent la faible teneur en phosphore et son impact sur la végétation des dunes de Braunton Burrows. Woodhouse et Hanes (1966) trouvent de 1 à 10 ppm de P dans les sols de dunes de la Caroline du Nord et obtiennent certains résultats en fertilisant ces sols en phosphore et en azote.

L'analyse foliaire a décelé des concentrations variant entre 0.125 et 0.390% de phosphore, sans différence marquée entre les éléments phytosociologiques (Tableau 5 et Fig. 2). Jagschitz et Bell (1966, p. 20) trouvent de 0.13 à 0.26%, alors que Willis (1965) affirme pour sa part: "*phosphate levels in young plants from the dunes are not especially low (c. 1.0 mg P/g dry weight shoot (i.e. 0.1%)*" (p. 742).

Bref, bien que les sables soient déficitaires en phosphore, l'ammophile trouve les sources qui lui sont nécessaires pour son alimentation en cet élément, vraisemblablement par la voie de microorganismes (cf. Nicolson 1959, 1960).

Cations échangeables

L'eau de mer, marées et embruns, apporte sur le rivage quantité d'éléments nécessaires à la nutrition des plantes. Parmi les éléments majeurs notons K, Mg, Ca, des sulfates et des bicarbonates; parmi les éléments mineurs, le Cl et des borates.

TABLEAU 6. Concentrations (ppm) des cations échangeables dans les sables de dunes mobiles

Ion	Moyenne (dunes)	Min.-max. (plage et dunes)	Min.-max. (Robitaille)	Min.-max. (Woodhouse et Hanes)	Min.-max. (Willis <i>et al.</i>)
K ⁺	28.8	20-81	10-53	20-33	6-50
Na ⁺	217.9	163-1700	88-595	28-219	11-528
Mg ²⁺	50.0	33-248	41-97	18-55	990-2270
Ca ²⁺	108.1	50-210	90-180	177-6231	62 300-70 400

Parmi les éléments dosés (K, Na, Mg, Ca) le potassium, le sodium et le magnésium ont des variations de concentration, qui bien que d'ordre de grandeur différent, suivent à peu près la même courbe (Tableau 1 et Fig. 1): concentration très élevée dans la zone intertidale, diminution brusque puis concentration à peu près uniforme dans les divers éléments phytosociologiques. Le Tableau 6 présente la moyenne de tous les échantillons à l'exclusion de ceux des plages 1, 2 et 3, les valeurs minima et maxima obtenues ainsi que les résultats de Robitaille (1968), de Woodhouse et Hanes (1966) et de Willis *et al.* (1959) à titre comparatif.

Le travail de Willis et Yemm (1961) rapporte une légère déficience en K pour les dunes de Braunton Burrows; les résultats des dosages effectués pour la Dune du Sud révèlent, en moyenne, des concentrations un peu plus élevées. D'autre part, la fertilisation en K en Caroline du Nord (Woodhouse et Hanes 1966) n'a donné aucun résultat probant. En ce qui concerne les autres éléments, y compris les éléments mineurs (Fe, Mn, Cu, Zn, B, Mo), ces auteurs notent que tous les sols qu'ils ont étudiés en contiennent des concentrations suffisantes.

Dans les cas du potassium, du sodium et du magnésium, l'analyse statistique isole dans une première population statistique les deux premières zones de la plage (P1 et P2), la troisième zone de la plage et tous les éléments phytosociologiques (à l'exception de celui à *Ammophila-Vaccinium* dans les cas du Na) étant groupés dans une autre population statistique tout à fait différente de la première ou reliée à la première population par l'un de ses éléments (Fig. 1). Le substrat de l'élément à *Ammophila-Vaccinium* présente une concentration en Na légèrement différente de celles des autres éléments phytosociologiques mais quand même reliée à cette population par l'intermédiaire des éléments à *Ammophila-Myrica-Smilacina* et à *Ammophila-Juncus*. On peut conclure que les ions K et Mg sont rapidement lessivés et atteignent une certaine concentration apparemment sans relation avec les différents éléments phytosociologiques. La concentration en ions sodium, plus forte en parties par million que celles des ions K et Mg atteint un palier puis continue à diminuer. On peut penser que les

embruns apportent suffisamment de Na pour maintenir une certaine concentration de cet ions dans le sol mais qu'en dehors de la zone régulièrement affectée par les embruns, la concentration en Na continue à diminuer.

La concentration en calcium présente un schéma un peu différent; l'analyse statistique révèle quatre populations statistiques (Fig. 1). Ces populations sont toutes reliées entre elles et fort peu différentes, à l'exception de la première qui présente une grande variation (Ca mesuré: 488, 156, 178, 140, 1275 ppm). Ce type de relation interpopulation peut s'interpréter comme une diminution lente de la concentration en calcium. Cette diminution progressive peut s'expliquer du fait que les débris de coquillages contenus dans le sable libèrent peu à peu le Ca qu'ils contiennent, constituant ainsi un deuxième apport lent et continu, probablement plus important que les embruns. Notons de plus que la quantité de Ca dosée comporte une grande partie de Ca inactif.

Comme dans le cas de l'azote, les feuilles des spécimens de la station I présentent des concentrations beaucoup plus élevées en potassium et en sodium que celles des autres stations. Les analyses des sols correspondants ne laissent pas prévoir une différence aussi marquée; on peut présumer ici l'effet des embruns et des laisses de marée ou encore, comme déjà mentionnée, des facteurs biologiques intrinsèques comme l'âge des plantes analysées, etc.

En ce qui concerne le calcium et le magnésium, on ne peut discerner de véritable tendance, peut-être à cause du petit nombre d'analyses. La concentration variant peu d'une station à l'autre et les sables n'étant pas déficitaires en ces éléments, il est possible que la plante prenne la quantité qui lui est optimale, cette quantité variant peu d'un individu à l'autre.

On trouvera au Tableau 7 la comparaison entre les concentrations des divers éléments dans les feuilles de l'ammophile de la Dune du Sud et celles de la Caroline du Nord (Jagschitz et Bell 1966).

Pédogénèse et classification des sols

C'est le remaniement périodique par le vent et

TABLEAU 7. Comparaison (%) entre les concentrations des divers éléments dans les feuilles de l'ammophile de la Dune du Sud et celles de la Caroline du Nord

Élément	Min.-max. (Dune du Sud)	Min.-max. (Caroline du Nord)
K ⁺	0.21-1.33	0.8 -1.3
Na ⁺	0.15-0.76	0.25-0.4
Mg ²⁺	0.09-0.21	0.1 -0.12
Ca ²⁺	0.02-0.18	0.2 -0.5
P	0.13-0.39	0.13-0.26
N	0.73-2.57	1.3 -1.8

l'absence d'un couvert végétal adéquat qui empêche les sols de dunes mobiles d'évoluer. Ils appartiennent au grand groupe des régosols (6.1) au sens de National Soil Survey Committee of Canada (1970). Les sols des dunes mobiles étudiées appartiennent au sous-groupe des régosols orthiques (6.11), à deux exceptions près: (1) les sables de la zone intertidale (plage 1 et plage 2), possédant une conductivité supérieure à 4 mmho/cm, se classent dans le sous-groupe des régosols salins (6.11/5) et (2) les sols de certains fonds de caoudeyres appartiennent au sous-groupe des régosols gleyifiés (6.11/8). D'autre part, les paléosols que l'on trouve enfouis sous les régosols orthiques des dunes mobiles éloignées laissent supposer que ces derniers, lorsque les conditions générales du milieu l'ont permis, on pu évoluer vers les podzols. C'est d'ailleurs le type de sols que l'on trouve sur la dune fixée et la dune boisée (Grandtner 1968, p. 525-526).

Les régosols orthiques constitués de sables fins (la moyenne de sables fins pour les différentes unités d'échantillonnage variant entre 53 et 82%) ne présentent aucun horizon et peuvent être considérés homogènes si ce n'est de quelques stries noires d'origine organique et de paléo-horizons sur la dune mobile éloignée de la mer. Ces sables présentent différentes teintes de gris très pâle (10YR 7/1, 7/2, 6/2; 7.5YR 7/2, 6/2) pour la couche superficielle de sable sec et de bruns (10YR 7/4, 7/3, 6/3, 5/4, 5/2, 4/4, 4/3, 4/2; 7.5YR 5/4, 5/2, 4/4, 3/2) pour le sable humide qui constitue le reste du profil. La capacité d'échange cationique est toujours faible, la moyenne des différentes unités d'échantillonnage variant entre 0.62 et 1.00 meq/100 g, et n'augmente que très lentement dans les sols les plus évolués. Le pH passe de légèrement alcalin sur la plage et la première dune, à neutre dans les sols plus évolués (les moyennes des différentes unités d'échantillonnage variant entre 7.8 et 6.9) pour devenir moyennement acide (5.8) sur la dune mobile éloignée. La concentration des ions varie: de 211 à 372 ppm pour le sodium (180 ppm sur la dune mobile éloignée); de

27 à 33 ppm pour le potassium; de 48 à 78 ppm pour le magnésium; et de 83 à 165 ppm pour le calcium (valeurs moyennes des différentes unités d'échantillonnage).

La salinité varie, en général, (toujours en valeurs moyennes) de 0.230 à 0.326 mmho/cm avec des valeurs plus élevées pour le haut de plage (0.937 à 1.98 mmho/cm) et plus faible pour la dune mobile éloignée (0.91 mmho/cm) indiquant une tendance à la désalinisation dans les sols plus évolués. C'est depuis le haut de la plage, avant même le premier stade de colonisation par la végétation, et à tous les stades suivants de la succession primaire, que se trouvent les régosols orthiques. On les retrouve aussi sur la dune mobile éloignée de la mer mais avec quelques caractères légèrement différents: pH plus acide, concentration du sodium légèrement plus faible et présence d'un paléosol enfoui.

Les régosols gleyifiés ne se distinguent des régosols orthiques que par un pH légèrement acide (6.3) et la faible profondeur à laquelle se situe la nappe phréatique (eau douce: 0.20 mmho/cm), induisant par ses variations des horizons gleyifiés et des mouchetures de couleur rouge jaune (5YR 5/8-4/8), brun foncé (7.5YR 4/2-3/2) ou brun jaune (10YR 5/6). Dans le secteur étudié on ne trouve ces sols que dans les dépressions que forment les caoudeyres.

Les régosols salins, régulièrement baignés par les eaux de la mer, se distinguent des régosols orthiques par une salinité plus élevée, les valeurs moyennes des unités d'échantillonnage (P₁ et P₂) étant de 23 et 13 mmho/cm. Quant à la nappe phréatique, on note sa proximité de la surface du sol et sa salinité élevée (32 et 13 mmho/cm, valeurs moyennes des unités d'échantillonnage), voisine de celle de l'eau de mer dans les cas extrêmes. La concentration des ions est également plus élevée: 83 et 50 ppm de potassium; 1381 et 751 ppm de sodium; 174 et 100 ppm de magnésium; 447 et 203 ppm de calcium (valeurs moyennes des unités d'échantillonnage). La texture des sables est également différente: on ne compte que 41 et 53% de sables fins (valeurs moyennes des unités d'échantillonnage) et on remarque à l'occasion des stries noires d'origine organique. Dans le secteur étudié, ce n'est que sur l'estran que se trouvent ces sols.

Somme toute la série Dunes, cartographiée par Tardif (1967) mais non décrite, devrait être élevée au rang de famille puisqu'elle recouvre, dans le secteur étudié, au moins trois séries de sols apparentés que nous proposons de nommer: (1) série de la Dune-du-Sud, régosol orthique sur sable éolien; (2) série des Sillons, régosol gleyifié sur sable éolien; (3) série de Shag régosol salin sur sable éolien.

Conclusion

Cette étude permet de dégager certains caractères des sols de la plage et de la dune mobile des Sillons.

Le sable peut atteindre 8–10 m au-dessus de la nappe phréatique. En surface, lorsqu'il est sec, il prend différentes teintes de gris très pâles; il se teinte plutôt de brun très pâle lorsqu'il est mouillé (au-delà de 8 cm de profondeur). Les seuls couches et horizons pédologiques qu'on remarque sont (a) des stries noires, généralement minces (3–5 mm, 15 mm maximum) et discontinues, le plus souvent sur le haut de plage; (b) des paléohumus enfouis sous lesquels on trouve des horizons Ae (gris) et parfois des horizons bruns, vraisemblablement des horizons B; (c) des mouchetures et des horizons gleyifiés (brun rouge) dans certains profils de fond de caoudeyres.

Partout il s'agit de sable fin, à l'exception du sable en deçà de la ligne des hautes mers moyennes, qui est un sable moyen. Si le vent, la topographie, la distance de la mer et le facteur temps semblent jouer un rôle primordial dans la détermination du pourcentage de sable fin des sols de chacun des éléments phytosociologiques, la composition floristique et la densité du couvert végétal de l'élément phytosociologique peuvent être des facteurs à ne pas dédaigner.

Les premiers 5 cm du sol sont très secs et les 10 à 25 cm qui suivent sont secs mais à partir de 30 cm de profondeur, le profil devient moyennement humide et l'alimentation en eau des plantes semble être adéquatement assurée partout sur la dune mobile et la plage. Un élément phytosociologique semble être lié à la présence de la nappe phréatique à proximité de la surface du sol; cet élément relève plutôt d'une succession secondaire, bien différente de la succession primaire à laquelle appartiennent la plupart des autres éléments phytosociologiques étudiés.

Ces sols ont évidemment une très faible teneur en argile et en matière organique, et il semble que leur évolution dans le sens d'un enrichissement en particules colloïdales soit très lente, peu perceptible au niveau des différents éléments phytosociologiques.

Le pH varie de légèrement alcalin à neutre pour les sols des éléments phytosociologiques de la succession primaire; il est légèrement acide pour l'élément des fonds de caoudeyres (*Ammophila-Juncus*) et moyennement acide pour celui des dunes mobiles éloignées de la mer (*Ammophila-Vaccinium*). On note une tendance à l'acidification du sol dans le temps et l'esquisse d'une relation avec les différents éléments phytosociologiques. L'acidification lente du substrat se fait probablement par lessivage des ions calcium et sodium.

On remarque une diminution de la salinité avec le temps et une relation faiblement exprimée entre ce facteur et les différents éléments phytosociologiques. Il faut cependant garder en mémoire que les sels déposés par la mer sont très rapidement lessivés et aucun des sols colonisés par la végétation n'atteint un niveau suffisamment élevé de salinité pour interférer avec la croissance des végétaux. Même l'eau de la nappe phréatique n'est pas salée, à l'exception de celle des sols de l'estran.

Le dosage de l'azote dans les feuilles de l'ammophile indique une concentration plus élevée dans les feuilles des spécimens à la limite de la haute plage. Quant au phosphore, l'analyse foliaire ne semble pas établir de différences entre les spécimens provenant des divers éléments phytosociologiques.

La concentration en ions potassium, magnésium et sodium, très élevée dans les sables quotidiennement baignés par l'eau de mer, diminue très rapidement pour atteindre, dès le haut de la plage, un niveau qui reste à peu près constant dans tous les éléments phytosociologiques de la dune mobile. Dans le cas des ions potassium et sodium, l'analyse des feuilles d'ammophile indique une concentration plus élevée dans les feuilles des spécimens à la limite du haut de la plage. Quant au calcium, on observe dans le temps, une diminution lente de sa concentration; mais il ne faut pas oublier que les débris de coquillages contenus dans le sable libèrent peu à peu le calcium qu'ils contiennent et que le calcium dosé dans les sols comporte une grande partie de calcium inactif.

Tous les sols étudiés appartiennent aux régosols et la plupart sont des régosols orthiques décrits dans la série Dune du Sud. Dans le fond des caoudeyres, on trouve plutôt des régosols gleyifiés à pH plus acide que celui des régosols orthiques de la série de la Dune-du-Sud, et dont la nappe phréatique est située à faible profondeur; ces sols sont décrits dans la série des Sillons. Les sables de l'estran, régulièrement baignés par l'eau de la mer, relèvent plutôt des régosols salins: leur salinité est élevée, leur nappe phréatique située à faible profondeur est également salée, la concentration en ions sodium, potassium, magnésium et calcium est très élevée; il s'agit de sables moyens dans lesquels on observe à l'occasion des stries noires d'origine organique: c'est la série de Shag.

L'évolution de ces sols est très lente et la différenciation des horizons pédologiques semble inexistante. On discerne certaines tendances: diminution de la concentration en calcium et peut-être en sodium et en potassium, diminution de la salinité, et peut-être en relation plus étroite avec la végétation: enrichissement en particules colloïda-

les et acidification. On note aussi une relation un peu plus complexe où la végétation entre en jeu: l'augmentation du pourcentage de sable fin. Somme toute, les sols des différents éléments phytosociologiques sont très semblables, surtout en ce qui concerne la succession primaire. S'ils jouent un rôle déterminant pour la présence des groupements à ammophile en général, ils n'expliquent pas de façon catégorique la répartition des différents éléments phytosociologiques sur la dune à ammophile. Au niveau des sols, le passage d'un élément phytosociologique à l'autre est peu marqué, à peine perceptible.

Remerciements

Nous désirons remercier Yvon Laflamme et Jacques Bélanger, de l'Université Laval, de leurs conseils et avis scientifiques ainsi que José Cantalejo, Aimé Lamoureux, Ghislain Saint-Pierre et Jeannette McCann de leur assistance technique. Nos remerciements s'adressent également au Conseil national de recherches du Canada pour son aide financière (subvention no A-1751 à M. M. Grandtner et bourse post-grade à G. Lamoureux) et au Laboratoire de biologie marine des Iles-de-la-Madeleine (Gouvernement du Québec) pour son hospitalité. Enfin, nous sommes reconnaissants à Françoise Vaucamps qui a relu ce texte.

- ALBERDI, MIREN et RAMIREZ. 1967. Estudios en la zonacion. (Studies on the littoral zonation of higher vegetation in Mehvin (Valdivia, Chile) based on osmotic activity.) *Phyton* (Buenos Aires), 24(2): 77-83.
- AMIOT, L.-P., et B. BERNIER. 1962. Méthodes d'analyse chimique usuelle des sols et des tissus végétaux. Les Presses de l'Université Laval, Québec.
- BOYCE, S. G. 1954. The salt spray community. *Ecol. Monogr.* 27: 325-349.
- BOYKO, H. 1966. Salinity and aridity. W. Junk, The Hague.
- BRISEBOIS, D. 1972. Géologie de l'archipel des Iles-de-la-Madeleine. Min. Rich. Nat. Qué., Serv. Doc. Tech., Rapp. Prél. No. 28122.
- CHAPMAN, G. W. 1931. The cause of succulence in plants. *New Phytol.* 30: 119-127.
- CHAPMAN, V. J. 1942. The new perspective in the halophytes. *Q. Rev. Biol.* 17: 291-311.
- CONARD, H. S. 1935. The plant association of central Long Island. A study in descriptive plant sociology. *Am. Midl. Nat.* 16(4): 433-516.
- DAUBENMIRE, R. F. 1967. Plants and environment. A textbook of plant autecology. John Wiley & Sons, New York.
- DAVIS, J. H. 1957. Dune formation and stabilization by vegetation and plantings. *Beach Erosion Board, Tech. Memo.* No. 101.
- DIXON, W. J., et S. J. MASSEY. 1957. Introduction to statistical analysis. McGraw-Hill, New York.
- DUCHAUFOUR, P. 1965. Précis de pédologie. Masson et Cie, Paris.
- DUMONT, B., et L.-E. HAMELIN. 1959. Etude granulométrique des sables des Iles-de-la-Madeleine (P.Q.). *Cah. Géogr. Qué.* 5: 72-76.
- FALAISE, N. 1954. Les Iles-de-la-Madeleine. Etude géographique. Thèse Manuscrite, Fac. Lett., Univ. Montréal, Montréal.
- FRIED, M., et H. BROESHART. 1967. The soil-plant system, in relation to inorganic nutrition. Academic Press, New York et London.
- FUSTEC-MATHON, E., C. MATARD et J. DUPUIS. 1967. Pédologie dunaire du littoral atlantique. *Sci. Sol.* 1967(2): 25-54.
- GÉHU, J. M. 1960. Premières observations sur la répartition des Azotobacters dans les sables du complexe dunaire de la région de Wimereux-Ambleteuse. *Bull. Soc. Bot. Nord Fr.* XIII(4): 119-124.
- . 1964. La végétation psammophile des îles de Houat et de Hoedic. *Bull. Soc. Bot. Nord Fr.* XVII(4): 238-266.
- GRANDTNER, M. M. 1966. La végétation forestière du Québec méridional. Les Presses de l'Université Laval, Québec.
- . 1967. Les ressources végétales des Iles-de-la-Madeleine. *Fonds Rech. For., Univ. Laval, Bull. No 10.*
- . 1968. Quelques observations sur la végétation psammophile des Iles-de-la-Madeleine. *Collectanea Bot.* 7: 519-530.
- GUILCHER, A. 1958. Coastal and submarine morphology. J. Wiley & Sons, New York.
- GUIMONT, P., et C. LAVERDIÈRE. 1975. Les types de côtes aux Iles-de-la-Madeleine. *Ann. ACFAS*, 42(1): 80.
- HASSOUNA, M. G., et P. F. WAREING. 1964. Possible role of rhizosphere bacteria in the nitrogen nutrition of *Ammophila arenaria*. *Nature* (London), 202(4931): 467-469.
- JAGSCHITZ, J. A., et R. S. BELL. 1966. American beachgrass (establishment-fertilization-seedling). *Bull.* 383, Agricultural Experiment Station, University of Rhode Island, Kingston, RI.
- KEARNEY, T.-H. 1904. Are plants of sea beaches and dunes true halophytes? *Bot. Gaz.* (Chicago), 37: 424-436.
- KELLEY, A. P. 1925. Soil water of the New Jersey coast. *Ecology*, 6: 143-149.
- LACOURSÈRE, E., et M. M. GRANDTNER. 1971. Contribution à l'étude écologique de la végétation riparienne de l'île d'Orléans. *Nat. Can.* 98(3): 443-460.
- LAMOUREUX, G. 1973. Contribution à l'étude écologique des dunes mobiles (Les Sillons, Iles-de-la-Madeleine, Québec). Thèse M.Sc. Manuscrite, Univ. Laval, Fac. For. Géod., Québec.
- LAMOUREUX, G., et M. M. GRANDTNER. 1977. Contribution à l'étude écologique des dunes mobiles. I. Les éléments phytosociologiques. *Can. J. Bot.* 55: 158-171.
- MARTIN, W. E. 1959. The vegetation of Island Beach State Park, New Jersey. *Ecol. Monogr.* 29: 1-46.
- MOLINIER, R., VIANO, LE FORESTIER et J. P. DEVAUX. 1964. Etudes phytosociologiques et écologiques en Camargue et sur le plan du bourg. *Ann. Fac. Sci. Marseille*, 36: 1-100.
- MUNSELL SOIL COLOR CHARTS. 1954. Munsell Color Company Inc., Baltimore, MD.
- NATIONAL SOIL SURVEY COMMITTEE OF CANADA. 1970. The system of soil classification for Canada. *Can. Dep. Agric.*
- NICOLSON, T. H. 1959. Mycorrhiza in the gramineae. I. Vesicular-arbuscular endophytes, with special reference to the external phase. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 42(4): 421-438.
- . 1960. Mycorrhiza in the gramineae. II. Développement in different habitats, particularly sand dunes. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 43(1): 132-145.
- OOSTING, H. J., et W. D. BILLINGS. 1942. Factors affecting vegetational zonation on coastal dunes. *Ecology*, 23: 131-142.
- OTTMANN, F. 1965. Géologie marine et littorale. Masson et Cie, Paris.
- RANWELL, D. 1959. Newborough Warren, Anglesey. I. The dune system and dune slack habitat. *J. Ecol.* 47: 571-601.
- ROBERTSON, E. T. et C. H. GIMINGHAM. 1951. Contributions to

- the maritime ecology of St. Cyrus, Kincardineshire. Trans. Proc. Bot. Soc. Edinburgh, **35**: 370-412.
- ROBITAILLE, L. 1968. Contribution à l'étude du sol et de la végétation de la Dune-du-Sud, I.-M. Mém. Finissant, Fac. For. Géod., Univ. Laval, Québec.
- SALISBURY, E. J. 1952. Downs and dunes. G. Bell & Sons, Ltd., London.
- SANSCHAGRIN, R. 1964. Les Iles-de-la-Madeleine. Min. Rich. Nat. Québec, RG 106.
- SOIL SURVEY STAFF. 1962. Soil survey manual. U.S. Dep. Agric. Handb. **18**: 1-503.
- TARDIF, L. 1967. Pédologie des Iles-de-la-Madeleine. Div. Sols, Serv. Rech., Min. Agric. Col., Québec, Bull. Tech. No 13.
- TEUSCHER, H., et R. ADLER. 1960. The soil and its fertility. Reinhold Publishing Corporation, New York.
- WATERMAN, W. S. 1919. Development of root system under dune conditions. Bot. Gaz. (Chicago), **68**: 22-23.
- WELLS, B. W., et I. V. SHUNK. 1938. Salt spray: an important factor in coastal ecology. Bull. Torrey Bot. Club, **65**: 485-492.
- WILLIS, A. J. 1963. Branton burrows: the effects on the vegetation of the addition of mineral nutrients to the dune soils. J. Ecol. **51**: 353-374.
- 1965. The influence of mineral nutrients on the growth of *Ammophila arenaria*. J. Ecol. **53**: 735-745.
- WILLIS, A. J., B. F. FOLKES, J. F. HOPE-SIMPSON et E. W. YEMM. 1959. Branton burrows: the dune system and its vegetation. J. Ecol. **47**: 1-24, 249-288.
- WILLIS, A. J., et E. W. YEMM. 1961. Branton burrows: mineral nutrient status of the dune soils. J. Ecol. **49**: 377-390.
- WOODHOUSE, W. W., JR., et R. E. HANES. 1966. Dune stabilization with vegetation on the outer banks of North Carolina. Soils Information Ser. 8, Dep. Soil Sci., N.C. State University, Raleigh, NC.

