

Un exemple d'utilisation de l'écologie et de la biométrie sur un boisement de protection de l'environnement : La plantation de dunes de Cléder (Finistère)

par J. DÉNIEL *

INTRODUCTION

Les agressions de l'homme vis-à-vis de formations végétales indispensables à la conservation des sols et, par suite, à la protection des lieux habités sont de plus en plus fréquentes et graves de conséquences : le piétinement de la végétation herbacée, qui stabilise les dunes côtières par ailleurs soumises aux assauts des vents et de la mer, en fournit un exemple. La préservation de ces dunes est d'importance capitale pour beaucoup de communes côtières du Finistère. A la demande de plusieurs municipalités, le Service du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, y a procédé à des boisements de protection qui, outre leur utilité pratique pour fixation de la dune et leur rôle esthétique, permettent des observations écologiques d'un grand intérêt scientifique et technique sur la résistance des arbres aux vents et aux embruns salés.

Le présent article reproduit, de façon condensée — c'est-à-dire sans donner ni le détail des observations faites ni celui des traitements statistiques effectués (1) — les premiers enseignements tirés d'une expérience de boisement littoral faite, en accord et avec l'appui de la municipalité de Cléder, sur la dune communale, au lieu dit « Roguennic ».

DESCRIPTION DU SITE — ESSENCES ET METHODES DE PLANTATION UTILISEES

1. — OBJECTIF

Il s'agissait de constituer une masse forestière d'un côté du camping pour l'abriter contre les vents d'Est et améliorer l'aspect de la dune.

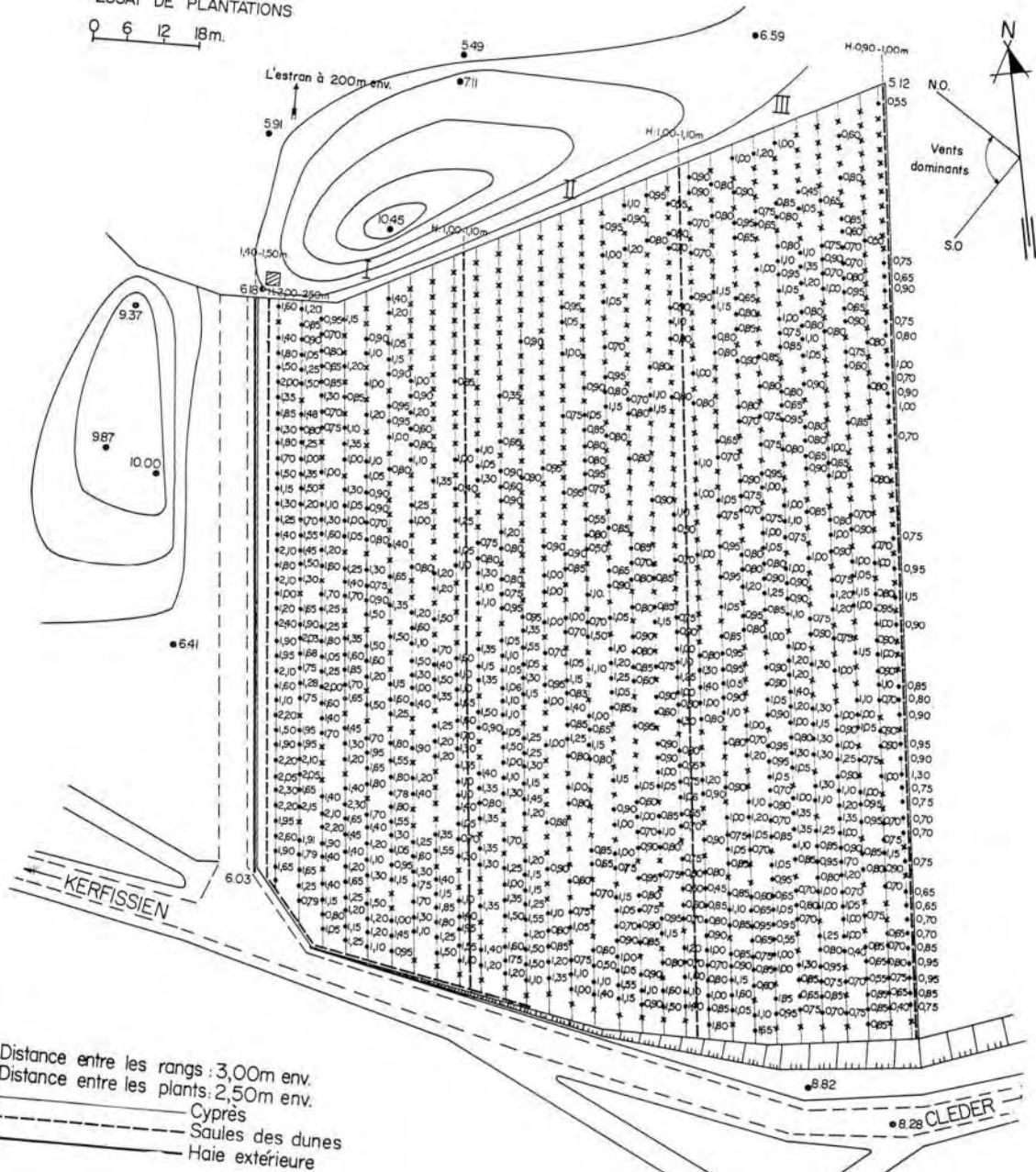
(*) Ingénieur en Chef du Génie Rural, des Eaux et des Forêts du Finistère.

(1) En bas de pages, nous signalerons cependant, à l'intention des lecteurs intéressés, les méthodes utilisées.

COMMUNE DE CLEDER

ESSAI DE PLANTATIONS

0 6 12 18m.



2. — CONDITIONS ÉCOLOGIQUES

Climat

Températures sans gros écarts ; gelées rares et faibles. Pluviosité réduite sur la côte, de l'ordre de 650 mm/an. Vents dominants de Nord-Ouest avec plus de 20 jours à pointes supérieures à 90 km/h, transportant de fortes quantités de sable accroché à la base de la dune, donc très agressifs pour toute végétation arbustive.

Pédologie

Sables faiblement coquilliers, donnant des sols peu acides mais pauvres et très filtrants, à pouvoir d'échange cationique très faible. La nitrification est superficielle et les produits en sont entraînés en profondeur. Au Sud-Ouest, des apports anciens de terre ont permis la formation d'un sol de meilleure qualité.

La placette plantée a été nivelée, mais, au Centre-Nord, subsiste une zone plus basse où, l'hiver 1968-69, assez humide, s'était formée une mare plus ou moins saumâtre qui a entraîné une mortalité importante de plants.

Ce phénomène ne s'est pas reproduit — du moins longtemps — durant les hivers suivants, ce qui a permis le remplacement des manquants.

De plus, la présence d'embruns et le dépôt de sel qui en résulte entraînent par vent violent, sur l'épiderme des plantes, la déshydratation des téguments, des écailles et des jeunes rameaux.

Exposition

La plantation est partiellement protégée par une haie complexe, plantée, côté ouest, en 1965. Au Nord, la dune est plus élevée et devrait servir d'abri ; mais, on constate que les vents venant du large se rabattent avec violence, notamment en empruntant un couloir orienté Nord-Ouest/Sud-Est et passant dans la partie nord de la plantation où ils déforment en drapeau les plants introduits et en ralentissent la croissance.

3. — DATE ET MODALITÉS DE LA PLANTATION

La plantation de 1 515 plants a été effectuée durant l'hiver 1966-1967 à l'aide de plants de Cyprès de Lambert (*Cupressus macrocarpa*, HARTWEG) âgés de 3 ans et élevés en bord de mer pour assurer leur acclimatation. L'écartement des rangs est de 3 m et l'espacement des plants de 2,50 m.

La mise en place des plants avait été précédée d'un épandage de terre végétale provenant de travaux de voirie et suivie :

- d'un labour superficiel du sol et constitution d'ados pour réduire le danger hivernal de submersion, mais il n'avait pas été apporté de fumure chimique dont la fixation eût été insignifiante dans un tel sol ;
- de la pose d'une clôture, pour éviter déprédations et même piétinement par les touristes, qui ont — il faut le souligner — pratiquement détruit tout ce qui a été planté à l'extérieur des clôtures.

Sur les 1 515 plants introduits, 642 sont morts le premier hiver. Plusieurs plants d'autres espèces forestières avaient été

plantés à titre expérimental parmi les cyprès de Lambert, mais ont complètement disparu.

Le plan annexe illustre le dispositif général de plantation et donne, d'une part, les hauteurs des plants vivants (1), d'autre part, la localisation des arbres morts. Ce sont ces deux variables, a priori susceptibles de dépendre des facteurs d'environnement, qui vont être étudiées dans les deuxième, troisième et quatrième parties du présent article, par application des méthodes classiques de statistique mathématique dont l'usage se répand actuellement en écologie. Elles viennent, en effet, de faire l'objet d'un traité dont l'auteur est Mrs PIÉLOU, Professeur à l'Université d'Ontario, publié en 1970 en langue anglaise sous le titre « Mathematical Ecology » (éditeur : WILEY and Sons - New-York).

Dans la deuxième partie, la comparaison des moyennes des hauteurs, mesurées durant l'hiver, des arbres vivants dans trois blocs différant principalement par leurs distances à la haie brise-vent et une analyse de variance à un facteur seront obtenues en utilisant les résultats de calculs effectués sur le calculateur Olivetti « Programma 101 » de la Direction Départementale de l'Agriculture du Finistère.

Dans la troisième partie, une analyse de variance à deux facteurs — l'effet étant ici non plus la hauteur mais la mortalité constatée — est menée à bien sur la base de calculs effectués sur calculateur « Electronique Marcel Dassault » du CERA FER — Division Calcul — à Antony.

Dans la quatrième partie, une analyse de variance à deux facteurs, plus fine, et une analyse de régression polynomiale poussée jusqu'au second degré ont été obtenues grâce à l'emploi de l'ordinateur IBM du Centre National de la Recherche Forestière à Nancy.

Ainsi apparaît combien les investigations écologiques peuvent progresser par le recours à des moyens de calcul automatique de plus en plus perfectionnés qui, bien entendu, ne dispensent nullement les chercheurs, qui doivent avoir une large culture biologique, physico-chimique et mathématique, de mener leurs investigations avec rigueur et avec finesse.

★
★★

INFLUENCE SUR LA CROISSANCE DES ARBRES DE CERTAINS FACTEURS D'ENVIRONNEMENT

Le caractère étudié est la hauteur d'un plant de cyprès, mesurée en mètres et centimètres.

(précision de la mesure : $\pm 2,5$ cm)

La hauteur est une variable aléatoire dont on fait l'hypothèse que la loi dépend de la position du plant dans la parcelle étudiée.

La parcelle est divisée en 3 zones notées, sur le plan et dans les calculs ci-après, I — II et III, caractérisées chacune par son éloignement par rapport à la haie de protection contre les vents dominants d'Ouest.

1. — La question suivante peut être posée :

Les hauteurs moyennes des zones I, II et III sont-elles différentes de manière significative, c'est-à-dire peut-on écrire :

$$h_I \neq h_{II} \neq h_{III} \quad ?$$

(1) Mesurés durant l'hiver 1969-70.

Nous faisons l'hypothèse qu'à l'intérieur de chaque zone « h » est distribuée normalement (ceci pourra être testé), c'est-à-dire respecte la loi de LAPLACE-GAUSS.

Nous supposons également que les valeurs h_I , h_{II} et h_{III} sont indépendantes, ce qui n'est pas rigoureusement exact car les plants exercent un effet de protection mutuelle.

Calculs à effectuer :

- par zone : — nombre d'arbres
- moyenne des hauteurs ou espérance mathématique
- écart-type sur la hauteur
- pour l'ensemble de la population : les mêmes

Résultats :

I	II	III
$n_I = 268$ plants	$n_{II} = 256$ plants	$n_{III} = 349$ plants
$\bar{x}_I = 1,38$	$\bar{x}_{II} = 0,99$	$\bar{x}_{III} = 0,91$
$\sigma_I = 0,38$	$\sigma_{II} = 0,25$	$\sigma_{III} = 0,21$

ensemble : 873 plants $\bar{x} = 1,08$

$\sigma = 0,35$

Peut-on dire que l'on a, statistiquement :

$$\bar{x}_I > \bar{x}_{II} > \bar{x}_{III} \quad ?$$

a) Opposons l'hypothèse $\bar{x}_I = \bar{x}_{II}$ à l'hypothèse $\bar{x}_I > \bar{x}_{II}$

— Formons la différence des moyennes :

$$\Delta = | \bar{x}_I - \bar{x}_{II} | = 1,38 - 0,99 = 0,39 \quad (0,384)$$

— Calculons l'écart-type de cette différence :

$$\sigma_{\Delta} = \sqrt{\frac{\sigma_I^2}{n_I} + \frac{\sigma_{II}^2}{n_{II}}} = 0,03 \quad (0,0277)$$

— Formons le rapport : $\frac{\Delta}{\sigma_{\Delta}} = \frac{0,384}{0,0277} = 13,86$

— test simple (*) : comme $\Delta > 2,58 \sigma_{\Delta}$ on admet que la différence est significative au seuil de probabilité de 1 %,

c'est-à-dire que $\bar{x}_I > \bar{x}_{II}$ avec une probabilité supérieure à 0,99

b) Opposons l'hypothèse $\bar{x}_{II} = \bar{x}_{III}$ à $\bar{x}_{II} > \bar{x}_{III}$

$$\begin{array}{l|l} \Delta = 0,082 & \\ \sigma_{\Delta} = 0,0190 & \frac{\Delta}{\sigma_{\Delta}} = 4,32 \end{array}$$

ce qui implique que $\bar{x}_{II} > \bar{x}_{III}$ avec une probabilité supérieure à 0,99

2. — A l'intérieur de la 1^{re} zone, la distribution de la hauteur des plants suit-elle une loi normale, c'est-à-dire respecte-t-elle bien la relation ci-après :

m = fréquence de la classe x

$$m = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp. \frac{-(x - n)^2}{2\sigma^2}$$

$$m = \frac{1}{0,21\sqrt{2\pi}} \cdot \exp. \frac{-(x - 0,91)^2}{2 \times 0,21^2}$$

Cette vérification de la normalité de la distribution, au moins approximative, est indispensable à l'utilisation pratique du test de STUDENT.

Effectuons d'abord un regroupement des arbres en classes de 0,20 m d'intervalles de hauteur :

N° de classe	Limites	Effectif observé	Centre de classe
1	0,40 à 0,59	1	0,50
2	0,60 à 0,79	9	0,70
3	0,80 à 0,99	34	0,90
4	1,00 à 1,19	64	1,10
5	1,20 à 1,39	61	1,30
6	1,40 à 1,59	41	1,50
7	1,60 à 1,79	26	1,70
8	1,80 à 1,99	22	1,90
9	2,00 à 2,19	7	2,10
10	2,20 à 2,39	3	2,30
	Total.....	268	

(*) Ce test est le test de STUDENT, justifié dans de nombreux traités, par exemple G. LEFORT : Mathématiques pour les sciences agronomiques et biologiques. Armand COLIN, Paris 1967 (cf. pp. 595 à 604).



La palissade brise-vent doublée par la haie en saule des dunes



Vue orientée N.S. ; à droite, la haie brise-vent

Calcul de la moyenne et de l'écart-type :

à comparer au 1^{er} calcul :

$$\bar{x} = 1,329 \quad (1,38)$$

$$\sigma = 0,350 \quad (0,38)$$

Un test, parmi d'autres, de normalité comporte l'estimation des coefficients de PEARSON β_1 et β_2 respectivement liés aux moments centrés d'ordre trois et d'ordre quatre. Leurs valeurs théoriques pour une distribution normale sont 0 et 3. Tous calculs intermédiaires faits, on trouve, dans le cas particulier, $\beta_1 = 0,21$ et $\beta_2 = 2,78$, valeurs assez proches des valeurs théoriques, compte tenu de l'assez grand nombre d'individus de la population (268), pour que l'hypothèse de normalité soit admise.

3. — Les plants situés sur un même rang ont-ils leur hauteur distribuée normalement ?

On peut le vérifier sur quelques rangs à l'aide d'un test χ^2

Choisissons par exemple les rangs nos 2, 11 et 24.

		rang n° 2			rang n° 11			rang n° 24		
N° de classe	Limites	Effect. obs.	Fréquence théorique	Effect. théor.	Effect. obs.	Fréq. théorique	Effect. théor.	Effect. obs.	Fréq. théorique	Effect. théor.
0	0,20 à 0,39	—			1	0,0019	—			
1	0,40 à 0,59	—	0,0059		—	0,0098	—	—		
2	0,60 à 0,79	1	0,0185	1	3	0,1057	3	7	0,1287	6
3	0,80 à 0,99	3	0,0534	2	5	0,1958	6	14	0,3325	14
4	1,00 à 1,19	2	0,1144	4	10	0,2467	7	13	0,3424	14
5	1,20 à 1,39	8	0,1823	7	5	0,2119	6	7	0,1462	6
6	1,40 à 1,59	6	0,2165	8	2	0,1239	4	1	0,0255	1
7	1,60 à 1,79	8	0,1913	7	3	0,0496	2	—	0,0216	—
8	1,80 à 1,99	4	0,1259	4	—	0,0159	—	—		
9	2,00 à 2,19	4	0,0617	2	—		—	—		
			0,0301	1						
Totaux		36	1,0000	36	29	1,0000	29	42	1,0000	42
Moyenne		1,517			1,120			1,009		
Ecart-type		0,363			0,317			0,204		

Le test nécessite un regroupement des classes de faible effectif

rang n° 2			rang n° 11			rang n° 24		
Limites	Effect. obs.	Effect. théor.	Limites	Effect. obs.	Effect. théor.	Limites	Effect. obs.	Effect. théor.
— de 1,20	6	7	— de 1,00	9	10	— de 1,00	21	21
1,20 à 1,39	8	7	1,00 à 1,19	10	7	1,00 et +	21	21
1,40 à 1,59	6	8	1,20 et +	10	12			
1,60 à 1,79	8	7						
1,80 et +	8	7						
Total	36	36		29	29		42	42
Nombre de classes n	5		3			2		
Nombre de degrés de liberté (n — 3)	2		0			—		
χ^2	1,071		1,719			—		
χ^2_0 (5 %)	5,991		3,841 (pour 1 degré de liberté)			—		

Pour la définition du χ^2 et l'utilisation de la méthode correspondante, le lecteur pourra se reporter au traité précité de G. LEFORT (cf. pp. 645 à 652).

Pour les rangs 11 et 24, le nombre de degrés de liberté étant très faible, il y a lieu d'interpréter avec prudence les résultats.

Par contre, pour le rang n° 2, il apparaît clairement que l'hypothèse de distribution normale est justifiée par le fait que :

$$\chi^2_0 > \chi^2$$

Cette conclusion peut être étendue aux rangs 11 et 24.

4. — Y a-t-il une corrélation significative entre la hauteur d'un plant (h) et sa distance à la haie brise-vent (d) ?

$$h = f(d) ?$$

Pour répondre à cette question, il convient de calculer les coefficients de corrélation (1) entre la variable dépendante (h) et la variable indépendante (d) sur quelques profils d'arbres, par exemple trois.

(1) Pour la définition des coefficients de corrélation et de régression, le lecteur pourra se reporter au traité précité de G. LEFORT (cf. pp. 537 à 539).

Test pour 3 profils :

d	A	B	C
3,00	1,90	2,40	1,50
6,00	1,79	1,90	1,25
9	* 1,65	1,25	0,65
12	1,40	* 1,45	1,20
15	* 1,15	* 1,50	1,05
18	1,05	* 1,45	* 1,05
21	* 1,50	1,60	* 1,00
24	1,55	* 1,55	—
27	* 1,20	* 1,50	* 0,85
30	1,35	* 1,25	—
33	* 1,50	* 1,00	—
36	* 1,20	* 1,30	* 0,90
39	* 0,90	* 0,95	—
42	* 0,65	* 0,75	* 0,90
45	* 0,80	* 1,00	—
48	1,00	* 1,05	* 0,85
51	0,90	* 0,85	* 0,80
54	0,80	* 1,10	* 0,85
57	0,75	0,90	* 0,80
60	* 0,85	* 0,85	1,00
63	* 0,95	* 0,90	* 0,80
66	0,70	0,80	* 0,90
69	* 0,95	* 0,95	* 0,85
72	* 1,00	* 1,05	* 0,80
75	0,90	* 0,85	* 0,95
78	* 1,05	* 0,85	* 0,85
81	0,85	* 1,10	* 0,60
84	1,15	* 0,95	* 0,80
87	0,75	* 0,90	* 0,85
r =	— 0,730	— 0,767	— 0,613
	Hautement significatif	Hautement significatif	Hautement significatif
r _O =	(1,30 %) = — 0,449	— 0,449	(1,24 %) = — 0,512

On peut aussi déduire de ce qui précède les équations des droites de régression :

Profil A : $h = 1,55 - 0,0097 d$

Profil B : $h = 1,68 - 0,0113 d$

Profil C : $h = 1,12 - 0,0043 d$

En schématisant, on peut dégager de cette première investigation que la distance de chaque arbre à la haie brise-vent a eu une influence notable, les statisticiens la qualifient de « significative », sur la croissance en hauteur des plants.

★
★★

* = interpolation entre 2 plants.



Vue orientée N.O.-S.E.

ANALYSE DE REGRESSION A TROIS VARIABLES

Pour pousser plus loin l'analyse des observations faites et la recherche des facteurs explicatifs, il a été tenté avec l'aide de M. LABYE et de M^{me} OBERLIN, de la Division « Calcul » du CERAFAER — Echelon d'Antony — une analyse de régression multiple entre le pourcentage des arbres morts sur des parcelles d'environ 700 m² (variables dépendantes), d'une part, et la distance à la mer et la distance à la haie brise-vent du centre de gravité de chaque parcelle, d'autre part. Les calculs ont été effectués sur calculatrice « Electronique Marcel Dassault ». Voici les conclusions qui s'en dégagent :

Le coefficient de corrélation totale (0,821) entre les variables : pourcentage de plants morts et distance de la mer, est significatif à un seuil de moins de 1 % (le seuil de 1 % correspond à $r = 0,5487$ pour le test de Student).

Par contre, le coefficient de corrélation totale (0,183) entre les variables : pourcentage de plants morts et distance du brise-vent, est non significatif, même à un seuil médiocre (à 10 %, $r = 0,37$).

Dans la régression multiple, la distance à la mer est donc le facteur explicatif le plus important.

L'équation de régression à deux facteurs explicatifs pourrait, sous la réserve précédente de la signification du terme de liaison avec la distance à la haie brise-vent, être :

$$x = 136,6 - 0,346 m + 0,087 d$$

x = % des plants morts,

m = distance à la mer,

d = distance à la haie brise-vent.

Pour être plus rigoureux, il faudrait tenir compte des variations d'effectifs dans les parcelles étudiées.

De cette seconde investigation il apparaît que la distance à la mer de chaque plant, plus ou moins grande suivant sa position dans le massif, est un facteur explicatif de la mortalité des jeunes arbres à prendre en considération, ce à quoi on devait s'attendre « a priori » mais devait néanmoins être statistiquement vérifié.

ANALYSE DE REGRESSION A CINQ VARIABLES

Pour tenir compte des remarques et conseils que M. le Professeur G. LEFORT, titulaire de la Chaire de Mathématiques de l'Institut National Agronomique, avait formulés après lecture des calculs résumés aux parties 2 et 3 précédentes, nous avons prié le C.N.R.F. — Station de Biométrie — à Champenoux, d'effectuer une analyse de régression à cinq variables explicatives des hauteurs moyennes des plants calculées sur des parcelles d'environ 1 200 m², à savoir :

- m = distance à la mer,
- d = distance à la haie brise-vent,
- m²
- d²
- m.d

En utilisant un programme de régression de la bibliothèque I.B.M.-E.P.I. et en introduisant tour à tour les variables qui expliquent le mieux la variable dépendante (h), le C.N.R.F. est parvenu à l'équation ci-après :

$$h = 1,119 + 0,00183 m - 0,019105 d + 0,0001204 d^2$$

L'ajustement est excellent puisque le coefficient de corrélation multiple atteint $r = 0,895$.

Une équation encore meilleure ($r = 0,914$) pour l'explication des phénomènes observés a été obtenue en introduisant la variable $\frac{m}{d}$:

$$h = 0,7707 + 0,036593 \frac{m}{d}$$

Mais M. MILLIER, responsable de l'Atelier de calcul du C.N.R.F., fait remarquer que les variations de d expliquent déjà $(0,773)^2 \times 100$ % des variations des hauteurs des arbres.

Grâce aux efforts conjoints de divers spécialistes, il a pu être dégagé une relation relativement simple entre la hauteur des arbres et les deux facteurs d'environnement que sont la distance à la mer de chaque plant et sa distance



Vue orientée N.E.-S.O.

à la haie brise-vent. Il sera intéressant de suivre l'influence respective de ces deux facteurs dans les prochaines années et notamment de vérifier si l'avance obtenue par les arbres les mieux abrités se conserve dans le temps.

CONCLUSION

De la réalisation, sans doute d'envergure limitée mais néanmoins audacieuse pour une commune rurale ayant de nombreuses autres charges d'équipement comme Cléder, on peut tirer deux sortes de conclusions :

D'abord, des conclusions d'ordre pratique qui confirment l'efficacité, pour la protection des jeunes plants, de la haie brise-vent exécutée et qui recourent les observations faites sur des parcelles agricoles, protégées ou non par des brise-vent, par MM. HALLAIRE, BOUCHET, DE PARCEVAUX et ARNOUX — Station centrale de Bioclimatologie et Service de Biométrie — CNRA Versailles (cf. « L'Eau et la Production Végétale » — INRA — 1964). L'effet de protection s'étend horizontalement sur 15 fois la hauteur de la haie.

Au plan méthodologique, cette expérience confirme l'intérêt qu'il y a à soumettre l'influence de certains facteurs d'environnement sur les êtres vivants à des analyses statistiques, ce qui, ensuite, permet de prendre des décisions avec le maximum d'objectivité et de sécurité. Les interventions de la Puissance publique (Etat, Collectivités locales, Etablissements publics) seraient mieux guidées et les ressources financières disponibles utilisées avec le maximum de garantie possible si de telles analyses étaient généralisées.

L'investigation précédente illustre l'opportunité, de plus en plus généralement admise, de compléter la formation des futurs spécialistes de l'écologie par une initiation assez poussée à la statistique mathématique et au calcul des probabilités.

Enfin, elle démontre l'intérêt d'un travail d'équipe (D.D.A. — Service de l'Aménagement Foncier et Forestier et Bureau d'Etudes — CERAFAER ; INRA ou Université) appuyé sur des moyens de calcul appropriés.

Nous rappelons, à toutes fins utiles, les définitions des expressions ci-après utilisées à plusieurs reprises dans l'étude précédente :

— Analyse de variance : technique visant à isoler les composants particuliers d'une variation à comparer avec la variance de l'erreur ;

— Analyse de régression : technique visant à estimer le degré de dépendance d'une variable appelée dépendante par rapport à une ou plusieurs autres qualifiées d'indépendantes.

Nous remercions M. le Professeur LEFORT, titulaire de la Chaire de Mathématiques de l'Institut National Agronomique, de ses conseils, ainsi que M. LABYE et Mme OBERLIN, de la Division « Calcul » du CERAFAER, et M. MILLIER, responsable de l'Atelier de calcul du C.N.R.F., de l'assistance qu'ils nous ont aimablement accordée pour la rédaction de cet article à laquelle ont également contribué M. MAZERAND, IGRF, et M. GUILLOU, Ingénieur topographe.