

0051165B

ÉVALUATION DU POTENTIEL ÉOLIEN

Isztar Zawadzki, Ph.D., chercheur principal
Réal Thivierge, M.Sc., prof. de recherche
Fabiola Renaud, M.Sc., prof. de recherche

TK
1541
Z39
Une étude réalisée pour le
Service de l'environnement atmosphérique
Environnement Canada

Contrat 09SD.KM 101-0-0666

Mars 1981.



TABLE DES MATIERES

CHAPITRE		PAGE
	LISTE DES FIGURES	ii
	LISTE DES TABLEAUX	iv
	INTRODUCTION	1
1	DESCRIPTION DES DONNÉES	3
	1.1 Digitalisation des données	3
	1.2 Formation des fichiers de travail	4
2	EFFETS DE LISSAGE SUR L'ESTIMATION DU POTENTIEL ÉOLIEN	8
	2.1 Introduction	8
	2.2 Effet de lissage sur l'évaluation de la puissance éolienne moyenne	9
	2.3 Comparaison du potentiel éolien calculé à partir de valeurs lissées et non lissées	16
	2.4 Conclusions	24
3	EFFETS D'ÉCHANTILLONNAGE SUR L'ESTIMATION DE LA PUISSANCE ÉOLIENNE	57
	3.1 Erreur d'estimation de la puissance éolienne journalière moyenne due à l'échantillonnage	57
	3.2 Fonction d'autocorrélation temporelle (FAC)	60
4	COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES ÉCHANTILLONNÉES ET DIGITALISÉES	82
	CONCLUSIONS GÉNÉRALES	86
	RÉFÉRENCES	88
	APPENDICE : Théorie reliée à l'évaluation de l'erreur systé- matique due à un lissage et à un échantillonnage des données.	90

LISTE DES FIGURES

FIGURE

PAGE

1.1	Enregistrement de la vitesse du vent à Dorval par l'anémographe le 1 ^{er} octobre 1978 entre 18 heures et 20 heures HNE.	7
1.2	Vitesse du vent à Dorval le 1 ^{er} octobre 1978 entre 17 heures et 18 heures telle que digitalisée à toutes les 72 secondes par l'ordinateur.	7
2.1	Diagramme de dispersion illustrant la relation entre la puissance éolienne moyenne $(\bar{p}_n) \propto (\bar{V}_n)^3$ et la puissance éolienne $(\bar{p}) \propto (\bar{V})^3$ calculée pour 12 minutes correspondant à des périodes échantillonales de 24 heures à la station Ste-Agathe du 1 ^{er} au 15 janvier 1978.	26
2.1.1.	Droite de meilleure régression de pente (Z_A) et droite insérée à l'intérieur de la bande d'un écart-type lié $(\bar{p} \bar{p}_n)$ de pente (Z_i) associées au diagramme de dispersion de la figure 2.1.	27
2.2	Idem figure 2.1 pour le jour.	28
2.3	Idem figure 2.1 pour la nuit.	29
2.4	Probabilité d'obtenir un potentiel éolien quotidien $(\bar{P}_n)$ à plus grand ou égal à $(\bar{p}_n)$ calculée à partir de valeurs lissées de la vitesse du vent pour $n = 12$ minutes.	35
2.8	Idem figures 2.4 à 2.8 pour le jour et pour la nuit.	37
2.9	à	@
2.13		41
3.1	Diagramme de dispersion illustrant la relation entre la puissance éolienne moyenne journalière évaluée avec les données horaires (p_h) et avec les données continues aux 72 secondes (p) pour la station Dorval du 1 ^{er} janvier au 15 janvier 1976.	66
3.2	Fonction d'autocorrélation normalisée de (p) à partir de données prises à toutes les 72 secondes (FACN72) pour la station Dorval du 1 ^{er} au 15 janvier 1976.	67
3.3	Idem figure 3.2 pour la station Dorval du 1 ^{er} au 15 octobre 1978.	68
3.4	Idem figure 3.2 pour la station Sept-Iles du 1 ^{er} au 15 janvier 1976.	69

3.5	Idem figure 3.2 pour la station Sept-Iles du 24 mars au 7 avril 1976.	70
3.6	Idem figure 3.2 pour la station Ste-Agathe au 1 ^{er} au 15 janvier 1978.	71
3.7	Idem figure 3.2 pour la station Ste-Agathe du 25 juin au 9 juillet 1976.	72
3.8	Fonction d'autocorrélation normalisée de (p_h) obtenue à partir des données horaires du vent (FACN1H) pour des délais de 1 heure à 48 heures pour Dorval du 1 ^{er} au 15 janvier 1976.	73
3.9	Idem figure 3.8 pour la station Dorval du 1 ^{er} au 15 octobre 1978.	74
3.10	Idem figure 3.8 pour la station Setp-Iles du 1 ^{er} au 15 janvier 1976.	75
3.11	Idem figure 3.8 pour la station Sept-Iles du 24 mars au 7 avril 1976.	76
3.12	Idem figure 3.8 pour la station Ste-Agathe du 1 ^{er} au 15 janvier 1978.	77
3.13	Idem figure 3.8 pour la station Ste-Agathe du 25 juin au 9 juillet 1976.	78
4.1	Diagramme de dispersion illustrant la relation entre la vitesse du vent horaire échantillonnée (v_e) et la vitesse du vent horaire digitalisée (v_d) 72 secondes avant l'heure pour la station Ste-Agathe du 1 ^{er} au 15 janvier 1978.	84

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAUX

PAGE

2.1	Statistiques résultant de la relation entre la puissance éolienne moyenne $(\bar{p}_n) \propto (\bar{v})_n^3$ et $(\bar{p}) \propto (\bar{v}^3)_n$ calculées pour 6 et 12 minutes correspondant à des périodes échantillonnelles de 24 heures.	42
2.2	Idem tableau 2.1, pour le jour et pour la nuit.	43
2.2.1	Différentes pentes des droites de meilleure régression associées au lissage des données de la vitesse du vent pour des périodes de lissage de 12 minutes et 60 minutes.	44
2.3	Distributions d'effectifs et de probabilités cumulées associées à différentes classes de puissances éoliennes moyennes $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ calculées pour 12 minutes correspondant à des périodes échantillonnelles de 24 heures pour la station Ste-Agathe entre le 25 juin et le 9 juillet 1976 (SJUJ15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1978 (SJAN15).	45
2.3.1	Distributions d'effectifs et de probabilités cumulées associées à différentes classes de puissances éoliennes (p_i) calculées à chaque 72 secondes correspondant à des périodes échantillonnelles de 24 heures pour la station Ste-Agathe entre le 25 juin et le 9 juillet 1976 (SJUJ15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1978 (SJAN15).	46
2.4	Idem tableau 2.3 pour la station Dorval entre le 1 ^{er} et le 15 octobre 1978 (DOCT15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1976 (DJAN15).	47
2.4.1	Idem tableau 2.3.1 pour la station Dorval entre le 1 ^{er} et le 15 octobre 1978 (DOCT15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1976 (DJAN15).	48
2.5	Idem tableau 2.3 pour la station Sept-Iles entre le 25 mars et le 7 avril 1976 (IMAA15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1976 (IJAN15).	49

2.5.1	Idem tableau 2.3.1 pour la station Sept-Iles entre le 25 mars et le 7 avril 1976 (IMAA15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1976 (IJAN15).	50
2.6	Distributions d'effectifs et de probabilités cumulées associées à différentes classes de puissances éoliennes moyennes ($\bar{p}_n$) et ($\bar{p}$) calculées pour 12 minutes durant le jour pour la station Ste-Agathe entre le 25 juin et le 9 juillet 1976 (SJUJ15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1978 (SJAN15).	51
2.7	Idem tableau 2.6 pour la station Dorval entre le 1 ^{er} et le 15 octobre 1978 (DOCT15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1976 (DJAN15).	52
2.8	Idem tableau 2.6 pour la station Sept-Iles entre le 24 mars et le 7 avril 1976 (IMAA15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1976 (IJAN15).	53
2.9	Distributions d'effectifs et de probabilités cumulées associées à différentes classes de puissances éoliennes moyennes ($\bar{p}_n$) et ($\bar{p}$) calculées pour 12 minutes durant la nuit pour la station Ste-Agathe entre le 25 juin et le 9 juillet 1976 (SJUJ15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1978 (SJAN15).	54
2.10	Idem tableau 2.9 pour la station Dorval entre le 1 ^{er} et le 15 octobre 1978 (DOCT15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1976 (DJAN15).	55
2.11	Idem tableau 2.9 pour la station Sept-Iles entre le 24 mars et le 7 avril 1976 (IMAA15) et du 1 ^{er} au 15 janvier 1976 (IJAN15).	56
3.1	Pente de la droite de meilleure régression, coordonnée à l'origine, coef. de corrélation. Graphique de la puissance éolienne (moyenne journalière) évaluée à partir des données de vent au 72 secondes (p) versus évaluée à partir des données horaires du vent (p_h).	79
3.2	Puissance éolienne maximale et minimale (moyenne journalière) en utilisant les données aux 72 secondes (p) et en utilisant les données horaires (p_h) du vent.	80

3.3 FACN pour un délai de 1 heure, 2 heures et 3 heures, à partir des données aux 72 secondes (FACN72) et à partir des données horaires (FACN1H) pour les différentes stations.

81

4.1 Statistiques résultant de la relation entre la vitesse du vent horaire échantillonnée (V_e) et la vitesse du vent horaire digitalisée (V_d) 72 secondes avant 1'heure pour 5 stations d'échantillonnage.

85

INTRODUCTION

Présentement, les données des stations climatologiques correspondent aux valeurs horaires de la vitesse du vent (V) mesurées suivant une résolution de n minutes (avec $n \approx 1$ minute). Ces valeurs horaires sont extraites à partir des valeurs lissées sur une minute telles qu'illustrées par la courbe de la figure 1.1. Si les générateurs d'éoliennes possèdent un temps de réponse de l'ordre de quelques secondes, et sachant que la puissance éolienne produite est proportionnelle à V^3 , on peut en déduire la problématique suivante :

- 1) La puissance moyenne ($\bar{p}$) calculée pour n minutes à partir de $(\bar{V}^3)_n$ est différente de la puissance moyenne ($\bar{p}_n$) calculée à partir de $(\bar{V})_n^3$ qui est la valeur donnée par les stations climatologiques.

$$\text{Nous avons : } (\bar{p}) = \int / 2 (\bar{V}^3)_n$$

$$(\bar{p}_n) = \int / 2 (\bar{V})_n^3$$

$$\text{et } (\bar{p}) \neq (\bar{p}_n)$$

Cette différence entre $(\bar{p})$ et $(\bar{p}_n)$ est causée par un problème de lissage. De même, le potentiel éolien obtenu à partir de la distribution de probabilités de la puissance éolienne sera influencé suivant le fait que les données de la vitesse du vent soient lissées ou non lissées.

- 2) D'un autre côté la puissance éolienne moyenne calculée sur des périodes journalières ou mensuelles à partir de données horaires est affectée par un problème d'échantillonnage, produisant des erreurs aléatoires et systématiques.

Les problèmes de lissage et d'échantillonnage peuvent être étudiés si l'on connaît la structure du vent sur une échelle fine à l'intérieur d'une minute et ce n'est pas le cas présentement. Cet exposé se propose d'étudier en détail à partir de données digitalisées de la vitesse du vent à toutes les 72 secondes les problèmes reliés aux erreurs causées par le lissage et l'échantillonnage des données. On trouvera en appendice la théorie relative à l'évaluation de l'erreur systématique due à un échantillonnage et à un lissage des données.

CHAPITRE 1. DESCRIPTION DES DONNÉES

1.1 Digitalisation des données

Afin d'illustrer différentes puissances éoliennes caractérisant certaines situations régionales du Québec, il a été convenu d'utiliser l'enregistrement de la vitesse du vent pour trois stations du Québec. Il a également été décidé de considérer différentes périodes de l'année afin de faire ressortir les changements saisonniers. Ainsi, six périodes de quinze jours ont été sélectionnées suivant les stations et les périodes suivantes :

Station de Dorval	:	du 1er au 15 janvier 1976
	:	du 1er au 15 octobre 1978
Station de Ste-Agathe	:	du 1er au 15 janvier 1976
	:	du 25 juin au 9 juillet 1976
Station de Sept-Iles	:	du 1er au 15 janvier 1976
	:	du 24 mars au 7 avril 1976

Les données ont été digitalisées à l'aide d'un digigraphe de marque SAC (Science Accessories Corporation). L'axe X du digigraphe caractérisant le temps d'enregistrement de la vitesse du vent, l'axe Y en détermine la vitesse. Le papier enregistreur de l'anémographe se déroulant à une vitesse d'un pouce à l'heure et la précision du digigraphe étant d'un centième de pouce, on peut donc ainsi générer une vitesse du vent à toutes les 36 secondes.

1.2 Formation des fichiers de travail

Aux 6 périodes de 15 jours de données correspondent 6 fichiers construits de façon identique. Ce sont le fichier DJAN15 qui contient l'information de la vitesse du vent du 1er au 15 janvier 1976 à Dorval, SJUJ15 pour Sainte-Agathe du 25 juin au 9 juillet 1976, SJAN15 également pour Sainte-Agathe du 1er au 15 janvier 1978, DOCT15 pour Dorval du 1er au 15 octobre 1978, IJAN15 pour Sept-Iles du 1er au 15 janvier 1976 et IMAA15 pour Sept-Iles du 24 mars au 7 avril 1976. L'information de ces 6 fichiers est contenue sur une bande magnétique et peut être récupérée facilement.

La formation de ces 6 fichiers étant identique, nous décrirons en détail un de ces fichiers à titre d'exemple. Soit le fichier DOCT15 qui représente la vitesse du vent à Dorval du 1er au 15 octobre 1978 :

```

_ 1 0 0 1 0 0 0 _ _ 3 6 _ _ 3 8 _ _ 3 5 _ 3 2 _ 3 2 _ 3 3 _ 3 1 ..... 3 8 _ _ 3 6
1 0 0 1 0 0 5
1 0 0 1 0 1 0
1 0 0 1 0 1 5
1 0 0 1 0 2 0
1 0 0 1 0 2 5
.
.
.
.
.
1 0 1 5 2 3 0
1 0 1 5 2 3 5

```

Chaque ligne du fichier présente deux informations bien distinctes :

- a) les 8 premiers caractères forment un premier bloc d'information :
 - le premier caractère est laissé en blanc
 - les 2 caractères suivants définissent le mois : ils varient de 01 à 12. La première ligne du présent exemple indique 10 correspondant au mois d'octobre.
 - les 2 caractères suivants définissent la journée : ils peuvent varier de 01 à 31.
 - les 2 caractères suivants caractérisent l'heure : ils varient de 00 à 23HNE.
 - le dernier caractère caractérise la demi-heure ; il prend la valeur 0 pour la première partie de l'heure et 5 pour la seconde partie de l'heure.
- b) les 100 autres caractères expriment la vitesse du vent à toutes les 72 secondes exprimée en centième de pouce. Afin d'exprimer cette valeur en mètre par seconde, il suffit de la multiplier par 0.1235.

Ainsi, chaque ligne d'un fichier représente une demi-heure de données. Les 15 journées représentent donc 720 lignes. C'est à partir du résultat de ces 6 fichiers que s'élaborera le traitement des données afin d'évaluer la technique du calcul de la puissance éolienne propre à une région d'un territoire.

Il est à remarquer que la trace de l'enregistrement de la vitesse du vent sur papier provenant de l'anémographe présente une courbe dont il a fallu tenir compte afin de ramener la séquence des données suivant des coordonnées cartésiennes. A cet effet, la formule suivante a été appliquée :

$$x = x_i - (500 \times (1 - \cos (\arctan (y_i/500 \sqrt{1 - (y_i/500)^2}))))$$

ou x_i = la distance parcourue par l'enregistreur au temps (t) en centième de po.

y_i = la vitesse du vent exprimée en centième de pouce.

500 = le rayon de courbure de l'enregistrement des données en centième de pouce.

x = la distance parcourue par l'enregistreur dans un plan cartésien en centième de pouce.

La figure 1.1 illustre un exemple d'enregistrement de la vitesse du vent à Dorval par l'anémographe le 1er octobre 1978 entre 17 heures et 20 heures. La courbe de la figure 1.2 indique l'information transmise à toutes les 72 secondes de la vitesse du vent telle qu'obtenue à partir de la digitalisation des données.

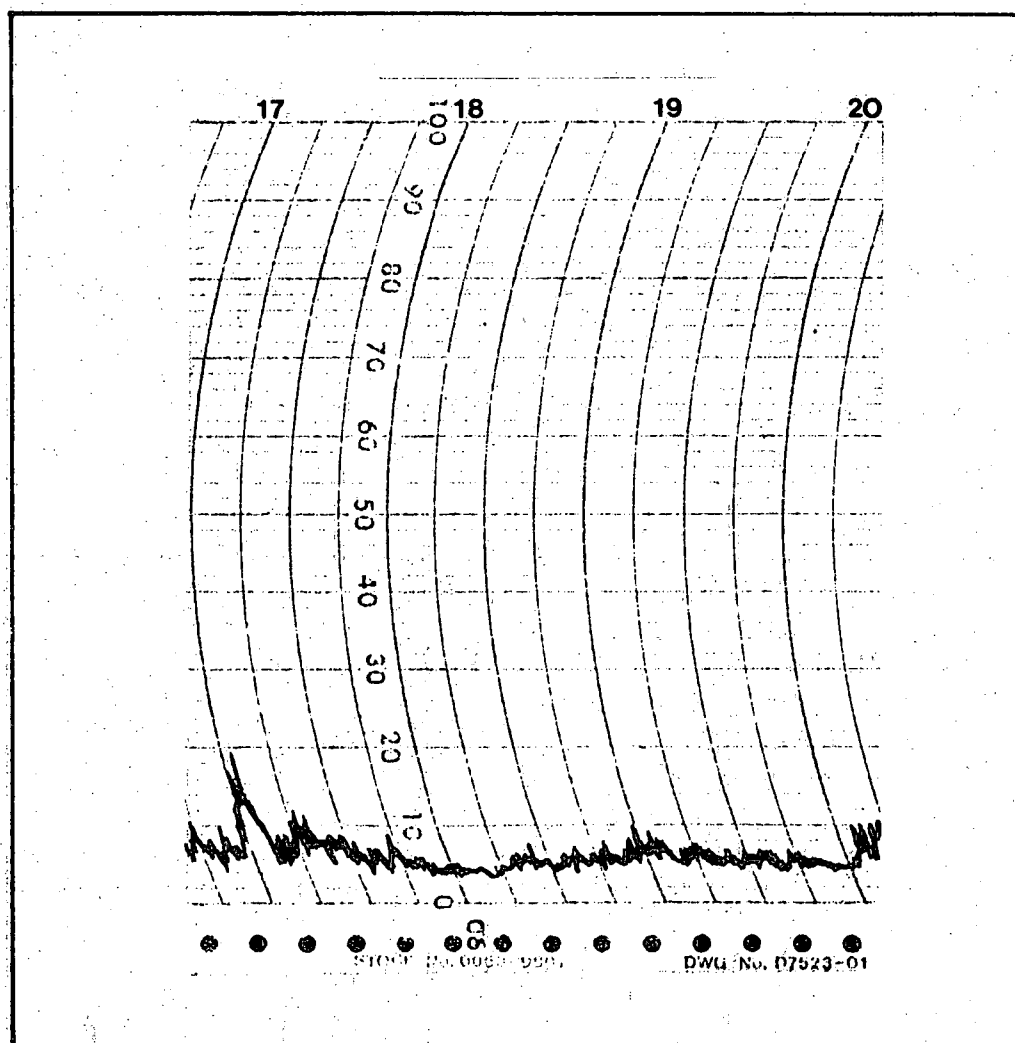


Figure 1.1; Enregistrement de la vitesse du vent à Dorval par l'anémographe le 1er octobre 1978 entre 17 hres et 20 hres HNE.

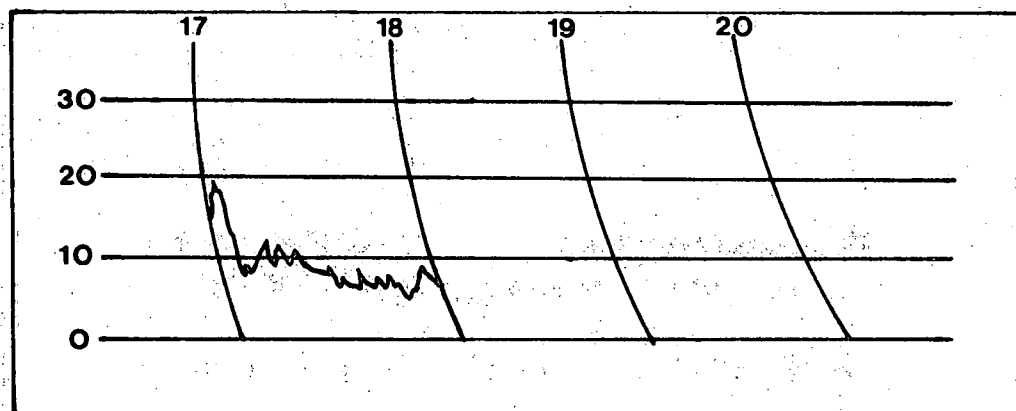


Figure 1.2: Vitesse du vent à Dorval le 1er octobre 1978 entre 17 hres et 18 hres HNE telle que digitalisée à toutes les 72 secondes par l'ordinateur.

CHAPITRE 2. EFFETS DE LISSAGE SUR L'ESTIMATION DU POTENTIEL ÉOLIEN

2.1 Introduction

L'énergie cinétique de l'air par unité de volume se définit par la relation suivante :

$$E = \rho/2 V^2$$

où (V) est la vitesse du vent moyennée sur un temps ou un espace de façon à ce que la turbulence à petite échelle soit éliminée. La puissance de l'air qui traverse une surface unitaire par unité de temps est :

$$p = \rho/2 V^3$$

Cet exposé se propose d'étudier l'effet du lissage des données de la vitesse du vent (V) sur l'estimation de la puissance éolienne (p).

Un lissage des valeurs de (V) s'effectue quand un observateur estime (V) en observant un anémomètre pendant quelques minutes ou quand un instrument automatique intègre (V) sur quelques minutes avant d'enregistrer les valeurs détectées. L'intérêt d'un tel lissage réside dans la réduction de la quantité d'information à retenir. Cependant, la variabilité de (p) est réduite et on peut se demander dans quelle mesure l'estimé de la puissance éolienne est affecté par le lissage, soit pour étudier les erreurs sur les données disponibles, soit pour optimiser la collecte des données.

Afin d'étudier les erreurs sur l'estimé de la puissance éolienne, nous allons comparer les statistiques de la vraie puissance

$$p = \rho/2 V^3$$

avec la puissance obtenu à partir des données lissées

$$p_n = \rho/2 (\bar{V})_n^3$$

où $(\bar{V})_n$ indique les valeurs lissées sur n minutes. A la rigueur, p représente aussi un estimé à partir des valeurs lissées sur 72 secondes (la résolution des données de base).

2.2 Effet de lissage sur l'évaluation de la puissance éolienne moyenne

L'enregistrement de la vitesse du vent telle que traitée par l'ordinateur nous fournit la valeur de la vitesse du vent en continu à toutes les 72 secondes. Ceci constitue un échantillon de 18,000 données par fichier (15 jours de données) ou 108,000 données au total en considérant l'ensemble des 6 fichiers.

L'évaluation de la puissance éolienne moyenne pour n minutes a été effectuée de 2 façons. Nous avons d'abord calculé la moyenne de la vitesse du vent pour n minutes pour ensuite élever cette quantité au cube. Ceci correspond à lisser les données sur des périodes de n minutes et d'évaluer la puissance éolienne à partir de cette moyenne. Ainsi, nous définissons la relation suivante :

$$(\bar{p}_n) \propto (\bar{V})^3_n \text{ où}$$

$(\bar{p}_n)$ = la puissance éolienne moyenne estimée
à partir de $(\bar{V})^3_n$

$(\bar{V})^3_n$ = la moyenne de la vitesse du vent (m/s)
élevée au cube pour des périodes de n
minutes : $n = 6, 12, 18$ minutes.

Nous avons aussi évalué la puissance éolienne en calculant la
moyenne du cube de la vitesse du vent pour des périodes de n minutes.

On peut ainsi définir la relation suivante :

$$(\bar{p}) \propto (\bar{V}^3)_n \text{ où}$$

$(\bar{p})$ = la puissance éolienne moyenne estimée à
partir de $(\bar{V}^3)_n$.

$(\bar{V}^3)_n$ = la vitesse du vent (m/s) élevée au
cube dont la moyenne a été calculée
pour des périodes de n minutes :
 $n = 6, 12, 18$ minutes.

Dorénavant, $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ témoigneront de l'estimé de la puis-
sance éolienne moyenne calculée à partir de valeurs lissées suivant $(\bar{V})^3_n$
et $(\bar{V}^3)_n$

Différentes puissances éoliennes moyennes calculées pour des
périodes de lissage de 6, 12 et 18 minutes ont été effectuées séparément
pour le jour et pour la nuit, ainsi que pour des périodes de 24 heures.

Rappelons que le nombre d'heures associées à la longueur du jour et de la

nuit correspond à l'heure normale de l'est du lever et du coucher du soleil (List, 1963). Ainsi, pour la période du 1^{er} au 15 janvier, la durée du jour est de neuf heures, soit de 08 heures à 17 heures HNE. Pour la période du 25 juin au 9 juillet, la durée du jour est de 16 heures, soit entre 05 et 21 heures HNE. Pour la période du 1^{er} au 15 octobre, la durée du jour est de 11 heures, soit entre 07 et 18 heures HNE. Quant à la période du 24 mars au 7 avril, la durée du jour est de 13 heures, soient entre 06 et 19 heures HNE.

Nous avons comparé les puissances éoliennes moyennes ($\overline{p}_n$) et ($\overline{p}$) calculées pour les 6 différents fichiers pour des périodes de 6 et 12 minutes. La figure 2.1 illustre la relation entre la puissance éolienne moyenne ($\overline{p}_n$) et ($\overline{p}$) calculée pour 12 minutes correspondant à des périodes échantillonnales de 24 heures à la station Ste-Agathe du 1^{er} au 15 janvier 1978. La droite en tireté indique la relation d'égalité entre ($\overline{p}_n$) et ($\overline{p}$). Par contre, la droite en trait plein témoigne de la droite de meilleure régression qui lie les 2 paramètres ($\overline{p}_n$) et ($\overline{p}$). On peut à partir de cette droite établir les 2 remarques suivantes :

- 1) la pente de la droite de meilleure régression est égale à 1.223 ce qui indique une erreur systématique de l'ordre de 22%. Cette erreur se traduit par une sous-estimation du calcul de la puissance éolienne moyenne ($\overline{p}_n$) à partir des valeurs lissées de la vitesse du vent par rapport à la puissance éolienne moyenne ($\overline{p}$) calculée à partir des

valeurs instantanées de la vitesse du vent.

- 2) la dispersion des points autour de la droite de meilleure régression témoigne de l'erreur aléatoire causée par le lissage. Les deux droites parallèles à la droite de régression sont situées à une distance $S_{\bar{p}} \bar{p}_n = 46.470 \text{ (m/s)}^3$ de part et d'autre de la droite de régression et représentent l'écart-type lié à la droite de régression. La valeur de l'écart-type lié montre que les valeurs de $(\bar{p})$ et $(\bar{p}_n)$ sont très concentrées autour de la droite de régression. Or, si les points sont distribués normalement de part et d'autre de la droite de régression, la théorie prévoit que 68% des points seront situés entre les droites. L'erreur aléatoire peut alors être calculée de la façon suivante (voir figure 2.1.1). Soit Z_1 la pente minimale des droites insérées à l'intérieur de la bande d'un écart-type lié ($S_{\bar{p}} \bar{p}_n$). On a :

$$Z_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} = \frac{3622.259 - 46.199}{3000 - 0}$$

$$Z_1 = 1.192$$

Soit Z_2 la pente de la droite de meilleure régression.

On a : $Z_2 = 1.223$.

L'erreur aléatoire peut alors être exprimée de la façon suivante :

$$\begin{aligned}(\epsilon) &= z_2 - z_1 = 1.223 - 1.192 \\ &= 0.031 \text{ ou } 3.1\%\end{aligned}$$

La même procédure pourrait être faite pour calculer la pente maximale des droites insérées à l'intérieur de la bande d'un écart-type lié, si bien que l'erreur aléatoire totale peut varier entre $\pm 3\%$ ou 6% en valeur absolue par rapport à l'erreur systématique qui est de l'ordre de 22% .

Ainsi, on en déduit que l'erreur aléatoire est très petite et négligeable par rapport à l'erreur systématique. Il est à remarquer que la figure 2.1 n'illustre pas de façon claire ce phénomène puisqu'une bonne partie des points débordent à l'extérieur de la limite des deux droites parallèles à la droite de régression. Ceci est causé par l'imprécision de la sortie du programme de l'ordinateur qui surimpose les points trop rapprochés. Ainsi, le pourcentage des points situés à l'extérieur des deux droites parallèles semble important mais ne représente en réalité qu'environ 10% de toutes les valeurs (1800 points).

Le tableau 2.1 montre différentes statistiques associées au calcul de la puissance éolienne moyenne ($\overline{p_n}$) et ($\overline{p}$) pour des périodes échantillonnées de 24 heures pour différents fichiers. On observe que le calcul de la puissance éolienne moyenne ($\overline{p_n}$) fait à partir des valeurs lissées de la vitesse du vent ($\overline{V}$) sur 12 minutes produit une erreur systématique importante qui se traduit par une sous-estimation de la puissance éolienne réelle moyenne ($\overline{p}$) pour les fichiers SJAN15 et SJUJ15 (Ste-Agathe du 1^{er} au 15 janvier 1978 et du 25 juin au 9 juillet 1976). En effet, la pente de la droite de meilleure régression prend la valeur de 1.223 pour le fichier SJAN15 et 1.152 pour le fichier SJUJ15. Pour les autres fichiers, la valeur des pentes des droites de régression montre une erreur inférieure à 10% sauf pour le fichier DOCT15 (Dorval, du 1^{er} au 15 octobre 1978), pour lequel la pente est égale à 1.107 ce qui laisse présager une erreur systématique légèrement supérieure à 10%. Toutefois, on note une légère diminution de l'erreur systématique si la puissance éolienne moyenne ($\overline{p_n}$), résulte de valeurs de la vitesse du vent lissées sur 6 minutes. Cependant, l'erreur est maintenue supérieure à 10% pour les fichiers SJAN15 et SJUJ15. (voir tableau 2.1).

Les figures 2.2 et 2.3 illustrent ces erreurs différenciées pour le jour et pour la nuit pour la station de Ste-Agathe du 1^{er} au 15 janvier 1978. La pente de la droite de meilleure régression de la figure 2.2 est égale à 1.262 ce qui indique une erreur systématique de l'ordre de 26% pour le jour et de 20% pour la nuit puisque la pente de la droite de meilleure régression est égale à 1.204 (voir figure 2.3). Les erreurs aléatoires se maintiennent peu importantes puisque la valeur de l'écart-type lié est de 38.589 (m/s)^3 pour le jour et de 37.374 (m/s)^3 pour la

nuir, ce qui entraîne des erreurs aléatoires totales de 8% pour le jour et de 6% pour la nuit. Il demeure toutefois que l'erreur aléatoire soit plus importante le jour que la nuit.

Le tableau 2.2 montre les mêmes statistiques calculées séparément pour le jour et pour la nuit. Les mêmes erreurs systématiques sont observées pour les mêmes fichiers pour des valeurs lissées de la vitesse du vent ($\bar{V}$) sur des périodes de 12 minutes. Cette erreur s'accroît durant le jour puisque l'on observe une augmentation de la valeur des pentes : 1.262, 1.156 et 1.100 pour les fichiers SJAN15, SJUJ15 et DOCT15 le jour comparativement à 1.204, 1.112 et 1.117 pour la nuit. Des valeurs lissées sur 6 minutes de la vitesse du vent diminuent de façon appréciable cette erreur systématique surtout durant la nuit puisqu'il n'y a que le fichier SJAN15 pour lequel la pente est supérieure à 1.100 soit l'accumulation d'une erreur systématique de 10% et plus (voir tableau 2.2).

Quant à l'ensemble des erreurs aléatoires, elles sont toutes négligeables. Différentes puissances éoliennes moyennes ont aussi été calculées pour une période de lissage de 60 minutes. Les pentes des droites de meilleure régression ainsi obtenues ont été comparées avec celles calculées à partir d'un lissage de 12 minutes comme le témoigne le tableau 2.2.1. Ainsi, on remarque que la différence entre les pentes des droites de meilleure régression résultant d'un lissage de 60 et 12 minutes est inférieure à 0.05 sauf pour le fichier SJAN15 durant la période échantillonnale de

24 heures et celle du jour. Il en est de même du fichier DOCT15 pour la période échantillonnale de la nuit. Toutefois, il n'y a que le fichier SJAN15 pour le jour qui montre une différence de pente supérieure à 0.100 soit la valeur 0.148. L'erreur systématique qui résulte d'un lissage de 60 minutes est donc comparable à l'erreur résultant d'un lissage de 12 minutes. On peut donc conclure que la variabilité de la vitesse du vent en général se retrouve à l'intérieur d'une échelle de 12 minutes de façon à ce qu'elle soit indifférente si les données de la vitesse du vent sont lissées sur une heure plutôt que sur une période de 12 minutes.

2.3 Comparaison du potentiel éolien calculé à partir de valeurs lissées et non lissées de la puissance éolienne.

Les valeurs de la puissance éolienne moyenne $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ correspondant à $(\bar{V})^3_n$ et $(\bar{V}^3)_n$ pour $n = 12$ minutes ont été distribuées suivant différentes classes, ces classes apparaissant dans les tableaux 2.3 à 2.11, elles ont été sélectionnées afin qu'il y ait une distribution homogène des effectifs à l'intérieur de chacune des classes.

Associée à ces différentes classes, nous avons calculé la probabilité cumulée $P(\bar{p}_n)$ et $P(\bar{p})$ qui est la probabilité que la puissance éolienne $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ soit plus petite qu'une certaine valeur de $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$.

La probabilité cumulée d'obtenir une valeur plus grande ou égale à $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ se définit alors de la façon suivante :

$$P((\bar{P}_n) \geq (\bar{p}_n)) = 1 - P(\bar{p}_n) \text{ et}$$

$$P((\bar{P}) \geq (\bar{p})) = 1 - P(\bar{p})$$

L'erreur systématique de lissage qui découle du calcul de la puissance éolienne suivant $(\bar{p}_n)$ et qui se répercute sur les distributions de probabilités est calculée de la façon suivante :

$$e = \frac{P((\bar{P}) \geq (\bar{p})) - P((\bar{P}_n) \geq (\bar{p}_n))}{P((\bar{P}) \geq (\bar{p}))} \quad (1)$$

Afin de visualiser les divers potentiels éoliens quotidiens, les figures 2.4 à 2.8 illustrent les différences régionales et temporelles associées aux différents paramètres $P((\bar{P}_n) \geq (\bar{p}_n))$ des tableaux 2.3 à 2.5, c'est à dire la probabilité d'obtenir un potentiel éolien $(\bar{P}_n)$ plus grand ou égal à $(\bar{p}_n)$ calculée à partir de valeurs lissées de la vitesse du vent pour $n = 12$ minutes.

A partir de la figure 2.4, on constate que même si l'année d'observation pour la station Ste-Agathe (1978) diffère de celle des deux autres fichiers (1976), le potentiel éolien le plus élevé caractérisant le mois de janvier a été obtenu à Dorval, puis à Sept-Iles et enfin à Ste-Agathe. La figure 2.5 fait ressortir les différences temporelles pour la station de Ste-Agathe entre le mois de janvier 1978 et ceux de juin, juillet 1976. Il est à remarquer l'erreur systématique de sous-évaluation du potentiel éolien en calculant $P(\bar{P}_n \geq (\bar{p}_n))$ en utilisant les valeurs de la vitesse moyenne du vent élevée au cube $(\bar{V})_n^3$ par rapport au paramètre $P(\bar{P} \geq (\bar{p}))$ en utilisant la moyenne du cube de la vitesse du vent $(\bar{V}^3)_n$ pour $n = 12$ minutes. Cette erreur est visible par la partie pointillée de la figure 2.5. La figure 2.6 montre la même phénomène pour la station de Dorval entre le mois d'octobre 1978 et le mois de janvier 1976. On note également la petite erreur systématique observée à la station de Dorval en octobre. La figure 2.7 témoigne du même phénomène pour la station de Sept-Iles pour les mois de janvier et mars avril 1976. L'erreur systématique calculée pour cette station étant très faible, elle n'est donc pas visualisée sur cette figure. Enfin, la figure 2.8 regroupe l'information du potentiel éolien mesuré aux 2 stations pour les différents mois de l'année. Il est à remarquer la véritable faiblesse du potentiel éolien observée à la station de Ste-Agathe par rapport aux 2 autres stations. Les tableaux 2.3 à 2.5 donnent les distributions d'effectifs et de probabilités cumulées associées à différentes classes de puissance éoliennes $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ calculées pour 12 minutes correspondant à des périodes échantillonales de 24 heures pour les différentes stations.

La puissance éolienne pour des intervalles de 72 secondes a aussi été calculée pour les 6 fichiers correspondant à l'enregistrement de la vitesse du vent aux 3 stations pour 2 quinzaines différentes. Ainsi, la puissance éolienne pour des intervalles de 72 secondes se définit comme suit :

$$p_i = \rho/2 v_i^3$$

où

p_i = la puissance éolienne calculée

pour $i = 0,72,144 \dots\dots\dots 18000$ secondes

v_i^3 = la vitesse du vent élevée au cube (m/s)³
pour $i = 0,72,144 \dots\dots\dots 18000$ secondes.

Les valeurs de p_i ainsi obtenues ont été distribuées suivant des classes identiques à celles choisies pour la classification des différentes puissances éoliennes moyennes ($\bar{p}$) et ($\bar{p}_n$) (voir tableau 2.3.1 à 2.51). Associée à ces différentes classes, nous avons calculé la probabilité que la puissance éolienne p_i soit plus petite qu'une certaine valeur de p_i . La probabilité cumulée d'obtenir une valeur plus grande ou égale à p_i se définit alors de la façon suivante :

$$P((P_i) \geq (p_i)) = 1 - P(p_i)$$

L'erreur systématique qui découle du calcul de la puissance éolienne à partir de valeur lissées ($(\bar{p}) = \rho/2 (\bar{v}^3)_n$ où $n = 12$ minutes) et non lissées ($p_i = \rho/2 v_i^3$) et qui se répercute sur les distributions de probabilités est calculée de la façon suivante :

$$e' = \frac{P(\bar{p}) \geq (\bar{p}) - P(p_1 \geq (p_1))}{P(\bar{p}) \geq (\bar{p})}$$

Comme le montre le tableau 2.3, l'erreur systématique (e) de la relation (1) est importante pour les fichiers SJUJ15 (station Ste-Agathe entre le 25 juin et le 9 juillet 1976 et du 1^{er} au 15 janvier 1978). On observe des valeurs supérieures à 0.100 donc des erreurs systématiques supérieures à 10% dans une bonne proportion des différentes classes de probabilité. Il est à remarquer dans l'ensemble, la faiblesse du potentiel éolien pour ces différentes classes puisque le paramètre $P(\bar{p}) \geq (\bar{p})$ indique pour le fichier SJUJ15 0.701 ou que 70.1% des valeurs de $(\bar{p})$ sont supérieures à 5 (m/s)³.

Cependant, le même paramètre calculé pour les fichiers DOCT15, DJAN15, IMAA15 et IJAN15 est supérieure ou égal à 0.850 ce qui signifie que 85% des valeurs de $(\bar{p})$ sont supérieurs à 5(m/s)³ pour les stations de Dorval et Sept-Iles au printemps en automne et en hiver (voir tableau 2.4 et 2.5). De plus, l'erreur systématique causée par l'effet de lissage est inférieure à 5% sauf pour le fichier DOCT15 (Dorval entre le 1^{er} et le 15 octobre 1978) où l'erreur est supérieure à 10% uniquement pour des valeurs de puissances éoliennes moyennes $(\bar{p})$ plus grandes ou égales à 320 (m/s)³. Il est toutefois à remarquer que cette erreur est répartie uniquement que sur 14.4% de l'ensemble des valeurs puisque le paramètre $P(\bar{p}) \geq (\bar{p})$ pour cette classe de $(\bar{p})$ est égal à 0.144.

On constate à partir des tableaux 2.3.1 à 2.5.1 que l'erreur e' est négligable pour la station Sept-Iles et cela en hiver comme au printemps. Toutes les valeurs de e' étant inférieure à 0.050, on en déduit une erreur systématique inférieure à 5% (voir tableau 2.5.1). Pour la station de Dorval en automne, (DOCT5) les valeurs de e' sont légèrement plus grandes mais elles n'atteignent jamais 0.100 c'est à dire une erreur égale à 10% (voir tableau 2.4.1). Pour la station de Ste-Agathe en été (SJUL15), on retrouve une augmentation de l'erreur systématique e' , mais uniquement pour les classes élevées de p_1 qui sont peu représentatives de l'ensemble des données. Toutefois, en hiver (SJAN15), on note que pour la classe de p_1 (entre 160 et 319.99(m/s)³) l'erreur systématique e' prend la valeur de 0.189 ou 18.9% sur 13.3% de l'ensemble des données ce qui n'est pas négligable (voir tableau 2.3.1). Cependant, le potentiel éolien pour cette station est beaucoup plus faible qu'aux stations de Sept-Iles et Dorval.

Le calcul du potentiel éolien effectué à partir de valeur lissées de la vitesse du vent au cube $(\bar{v}^3)_n$ pour $n = 12$ minutes, ne fait intervenir aucune erreur systématique significative par rapport au calcul du potentiel éolien effectué à partir de valeurs non lissées, à la station de Dorval pour 2 périodes échantillonnales de 15 jours en hiver et en automne et à la station de Sept-Iles pour 2 périodes échantillonnales de 15 jours en hiver et au printemps.

Les figures 2.9 à 2.13 illustrent les différents potentiels éoliens associés au jour et à la nuit. Afin d'éviter la répétition des mêmes énoncés, nous décrierons uniquement les figures 2.9 et 2.13. La

figure 2.9 dégage les disparités régionales pour le jour et pour la nuit de toutes les stations pour le mois de janvier. En général, le potentiel éolien diminue du jour à la nuit sauf pour le fichier IJAN15 où il augmente. La figure 2.13 montre l'ensemble de cet effet inhibiteur de la nuit sur le potentiel éolien pour l'ensemble des fichiers. Pour les régions où la structure de la vitesse du vent est comparable à celle de Sept-Iles et Dorval, le lissage des données de la vitesse du vent n'introduit aucun facteur d'erreur dans l'estimation de la puissance et du potentiel éolien.

Les tableaux 2.6 à 2.8 montrent les distributions d'effectifs et de probabilités cumulées associées à différentes classes de puissances éoliennes moyennes ($\bar{p}_n$) et ($\bar{p}$) calculées pour 12 minutes durant le jour pour les différentes stations. Les tableaux 2.9 à 2.11 illustrent les mêmes statistiques durant la nuit. Comme il fallait s'y attendre, le potentiel éolien diminue de façon drastique la nuit pour le fichier SJUJ15 (station Ste-Agathe juin, juillet 1976). Le tableau 2.9 montre que seulement 48.2% des valeurs de la puissance éolienne ($\bar{p}$) de la station SJUJ15 sont supérieures à 5 (m/s)^3 puisque le paramètre $P((\bar{P}) > (\bar{p}))$ est égal à 0.482. De même, l'erreur systématique (e) est pour toutes les classes supérieures à 5%.

Cette diminution du potentiel éolien nocturne est aussi apparente pour le fichier SJAN15 (station Ste-Agathe janvier 1978) mais de façon moins importante puisque 70.1% des valeurs de ($\bar{p}$) sont supérieures à 5 (m/s)^3 durant la nuit et 75.3% durant le jour (voir tableau 2.6 et 2.9).

L'erreur systématique est aussi moins importante et caractérise plutôt les classes à fortes puissances éoliennes ($\bar{p}$) supérieures ou égales à 80 (m/s)^3 (voir tableau 2.6 et 2.9).

En ce qui concerne les fichiers DOCT15, IJAN15 et IMAA15, la séparation jour nuit a peu d'influence sur le comportement du potentiel éolien (voir tableaux 2.7, 2.8, 2.10 et 2.11). Le fichier IJAN15 fait exception à cette règle puisque le potentiel éolien diurne est inférieur au potentiel éolien nocturne : 83.7% des valeurs de ($\bar{p}$) sont supérieures ou égales à 5 (m/s)^3 dans le jour contre 91% pour la nuit (voir tableau 2.8 et 2.11). Toutefois, le potentiel éolien étant élevé le jour comme la nuit, ceci n'influence en aucune façon la distribution de l'erreur systématique.

2.4 Conclusions

L'effet de lissage sur l'évaluation de la puissance éolienne moyenne $(\bar{p}_n) \propto (\bar{V})^3$ à partir de valeur lissées sur 6 et 12 minutes a été mis en évidence à la station de Ste-Agathe et cela, en hiver 1978 comme en été 1976. Aussi, une erreur systématique importante a été engendrée suivant le calcul de $(\bar{p}_n)$ qui est de l'ordre de 22% pour des périodes de 24 heures en hiver et de 15% en été pour une durée de lissage de 12 minutes. Durant le jour, l'erreur systématique varie entre 26% l'hiver et 15% l'été. Durant la nuit, cette erreur varie de 20% en hiver et 11% durant l'été. Il y a donc une augmentation de cette erreur systématique en hiver par rapport à l'été, et aussi durant le jour par rapport à la nuit. Une durée de lissage de 6 minutes fait diminuer cette erreur systématique, mais non de façon significative. Par contre aucun effet de lissage n'a été observé pour les stations de Dorval et Sept-Iles, en hiver 1976 de même qu'au printemps. On a observé un léger effet de lissage à Dorval en automne 1978 où l'erreur systématique engendrée est de l'ordre de 10%. L'erreur aléatoire est négligeable et cela, pour toutes les stations.

Les distributions de probabilités des différentes classes de puissances éoliennes montrent que le potentiel éolien de la station Ste-Agathe est très inférieure à celui des stations Dorval et Sept-Iles. Quant à l'erreur systématique engendrée sur le potentiel éolien, cette erreur n'est significative que pour la station Sainte-Agathe en hiver et en été de même que pour la station de Dorval durant l'automne.

Quant au potentiel éolien calculé à partir de données non lissées de la vitesse du vent, on note aucune erreur systématique importante par rapport à l'évaluation du potentiel faite à partir de valeurs lissées de la vitesse du vent.

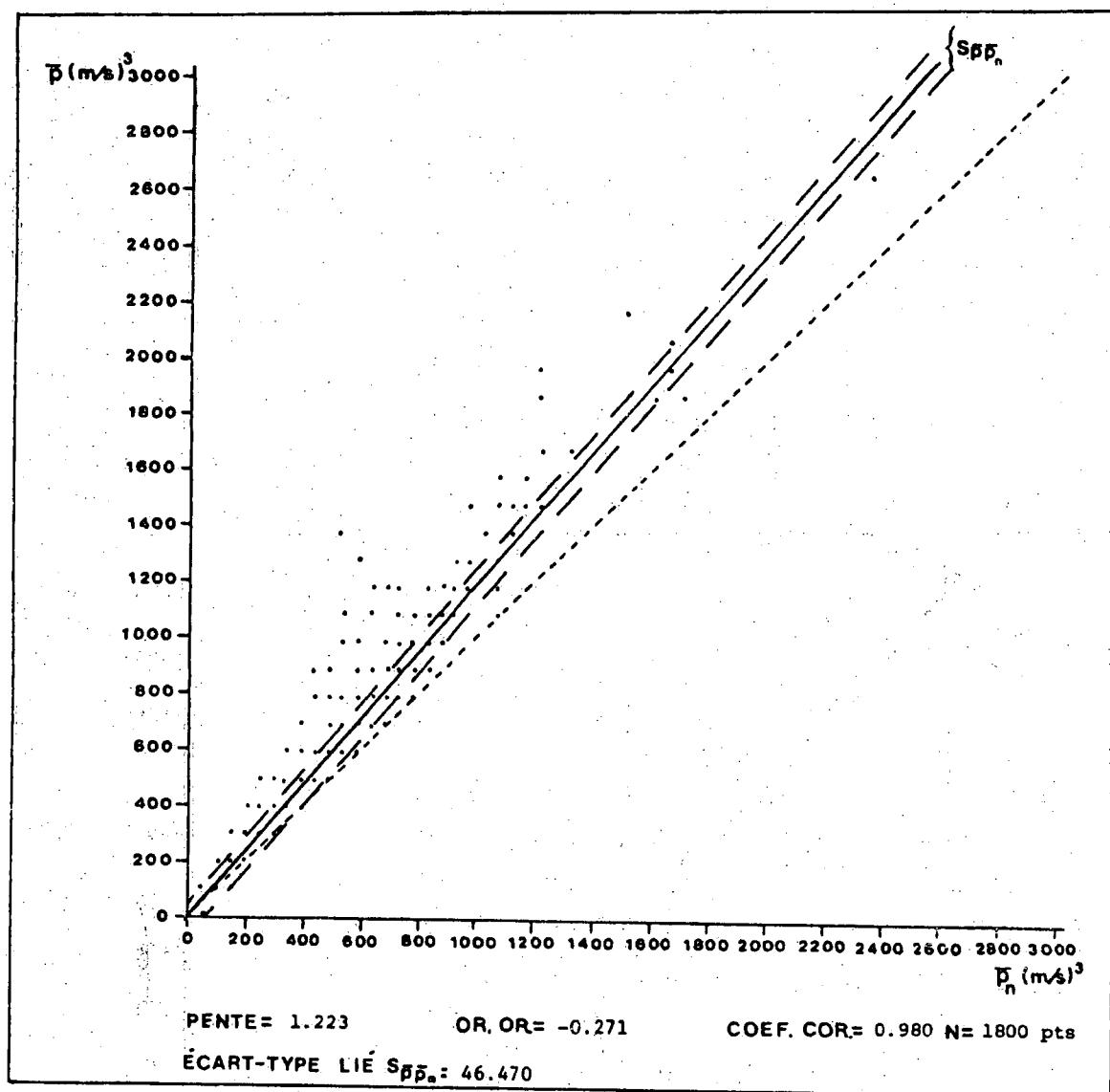


Figure 2.1 : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre la puissance éolienne moyenne ($\bar{P}_n$) $\propto$ à $(\bar{V})_n^3$ et la puissance éolienne (P_n) $\propto$ à $(V_n)^3$ calculée pour 12 minutes correspondant à des périodes échantillonnales de 24 heures à la station Ste-Agathe du 1er au 15 janvier 1978. La droite en trait plein indique la droite de meilleure régression entre ($\bar{P}_n$) et (P_n). La droite en tireté indique la relation: ($\bar{P}_n$) = (P_n).

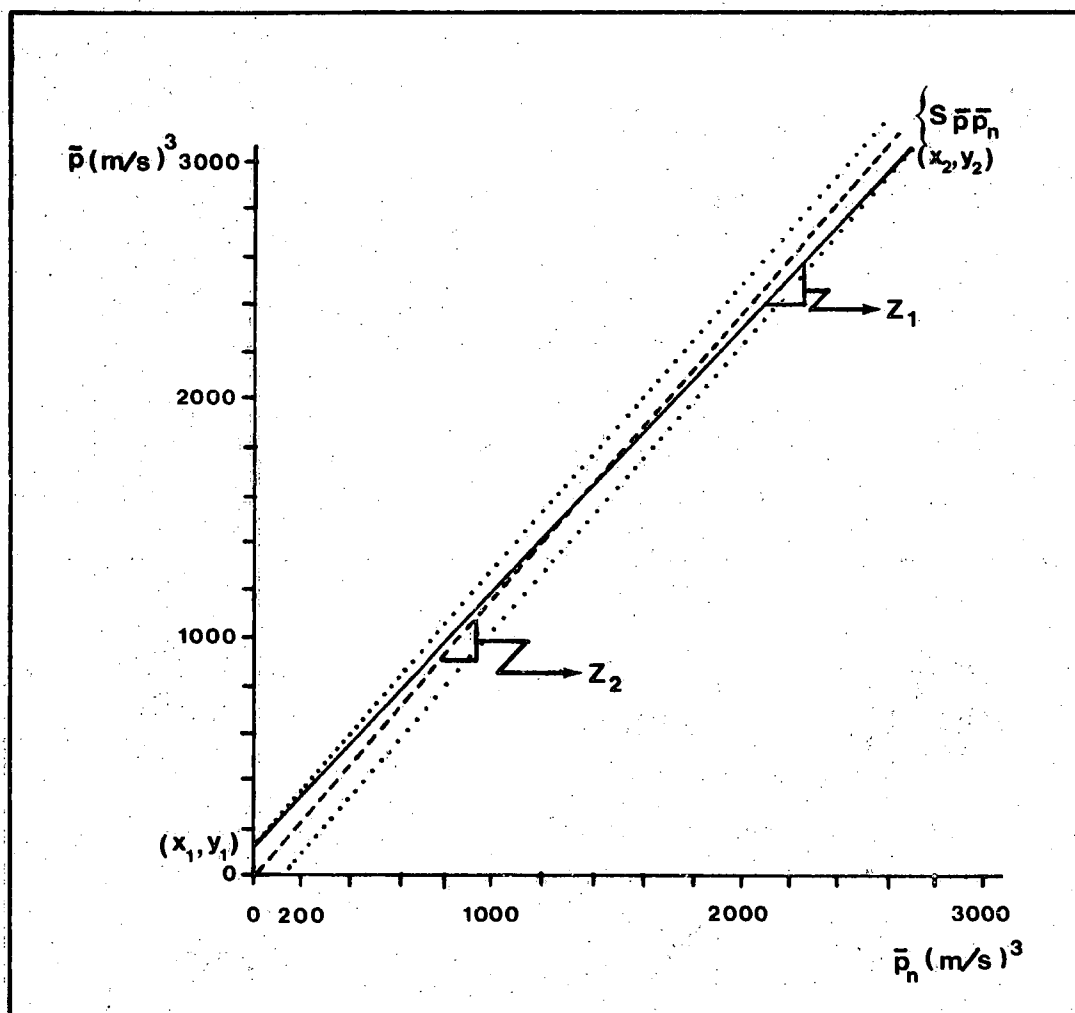


Figure 2.1.1: droite de meilleure régression de pente (Z_2) et droite insérée à l'intérieur de la bande d'un écart-type lié ($S_{\bar{p}\bar{p}_n}$) de pente (Z_1) associées au diagramme de dispersion de la figure 2.1.

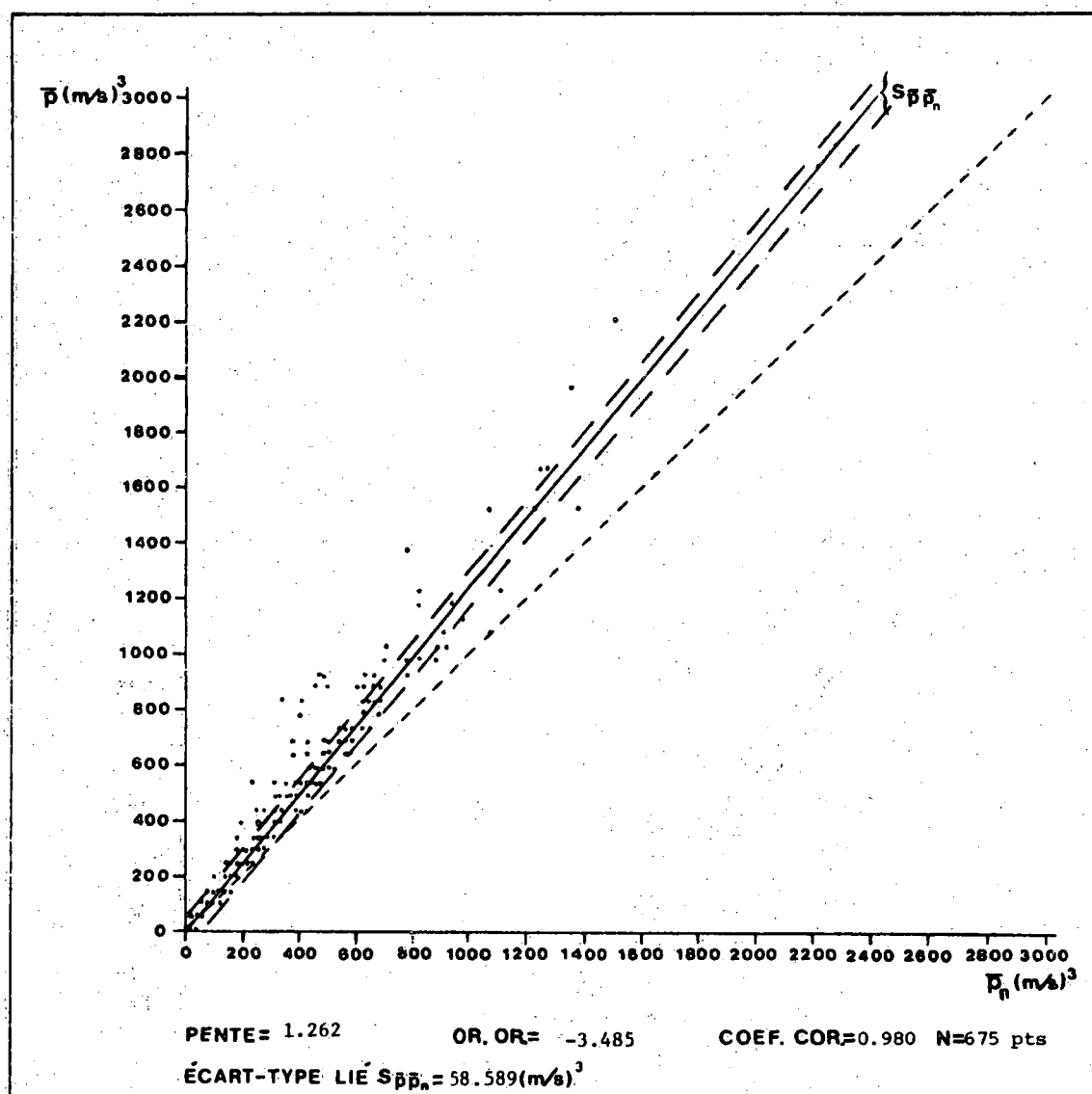


Figure 2.2 : Idem figure 2.1 pour le jour.

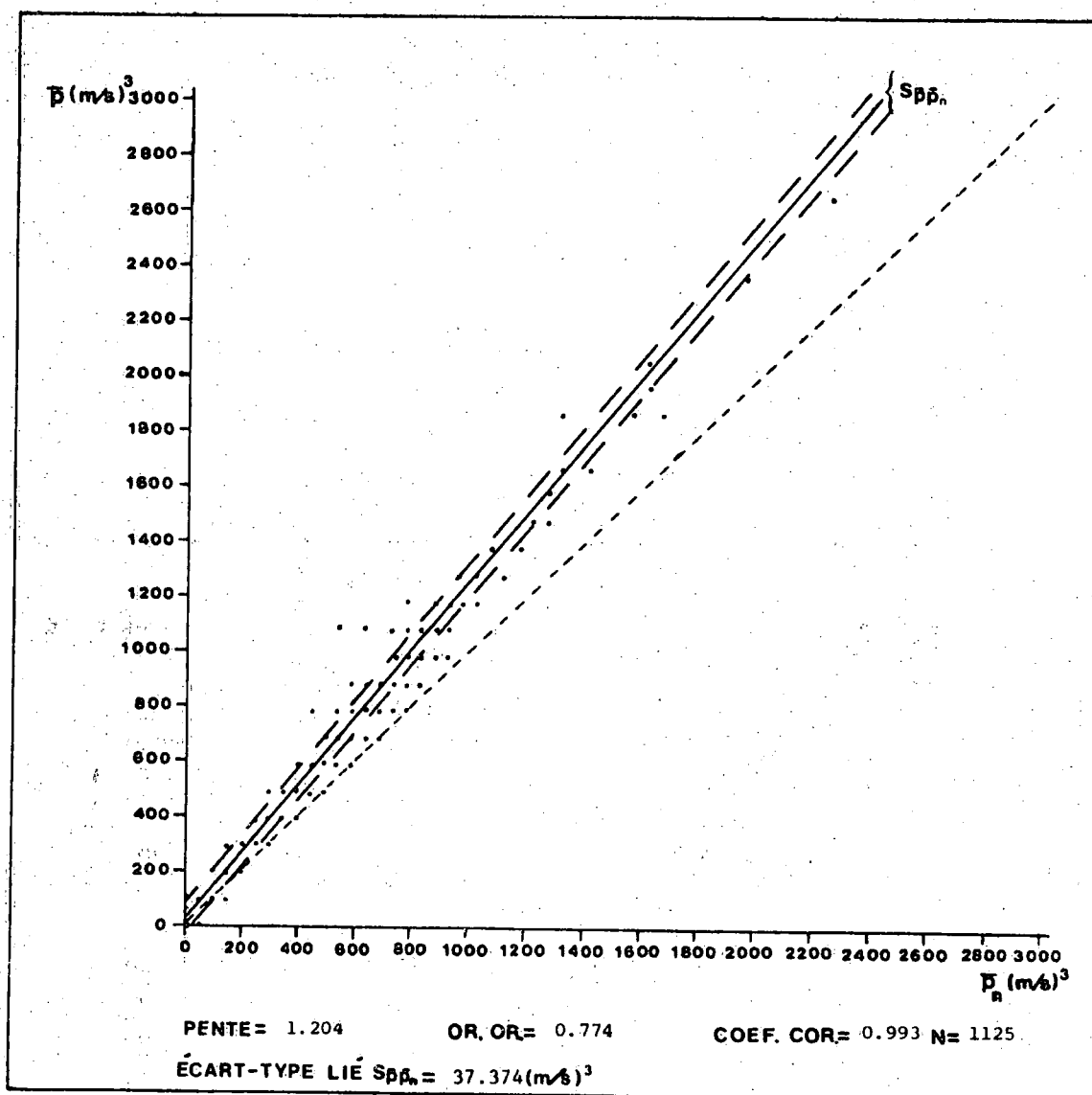
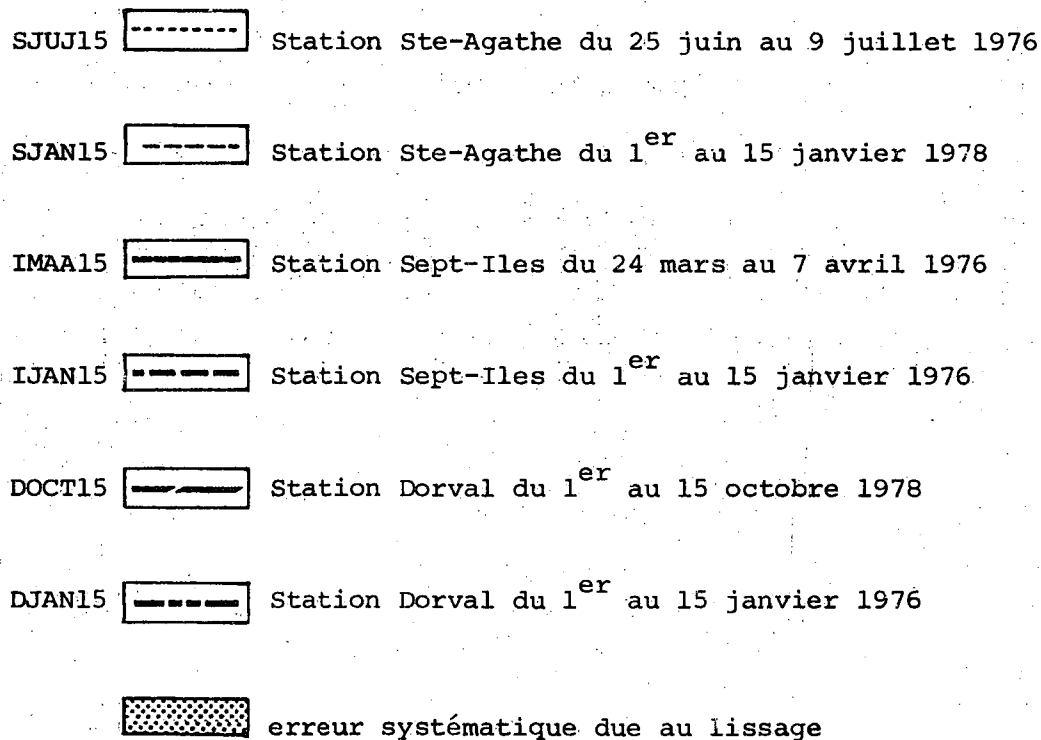
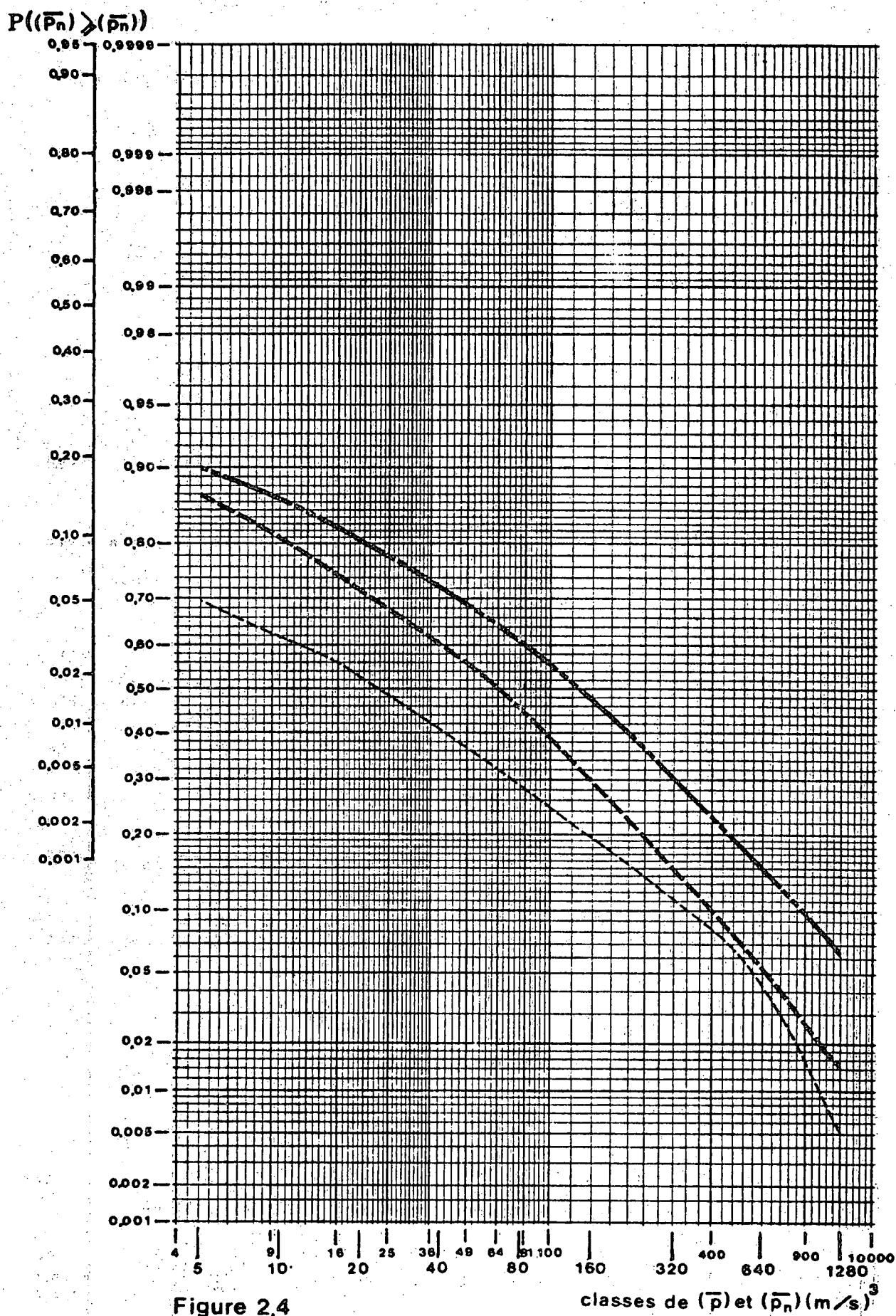


Figure 2.3 : Idem figure 2.1 pour la nuit.

Figure 2.4 à 2.8 : Probabilité d'obtenir un potentiel éolien
quotidien ($\bar{P}_n$) plus grand ou égal à ($\bar{p}_n$)
calculée à partir de valeur lissées de la
vitesse du vent pour $n = 12$ minutes.





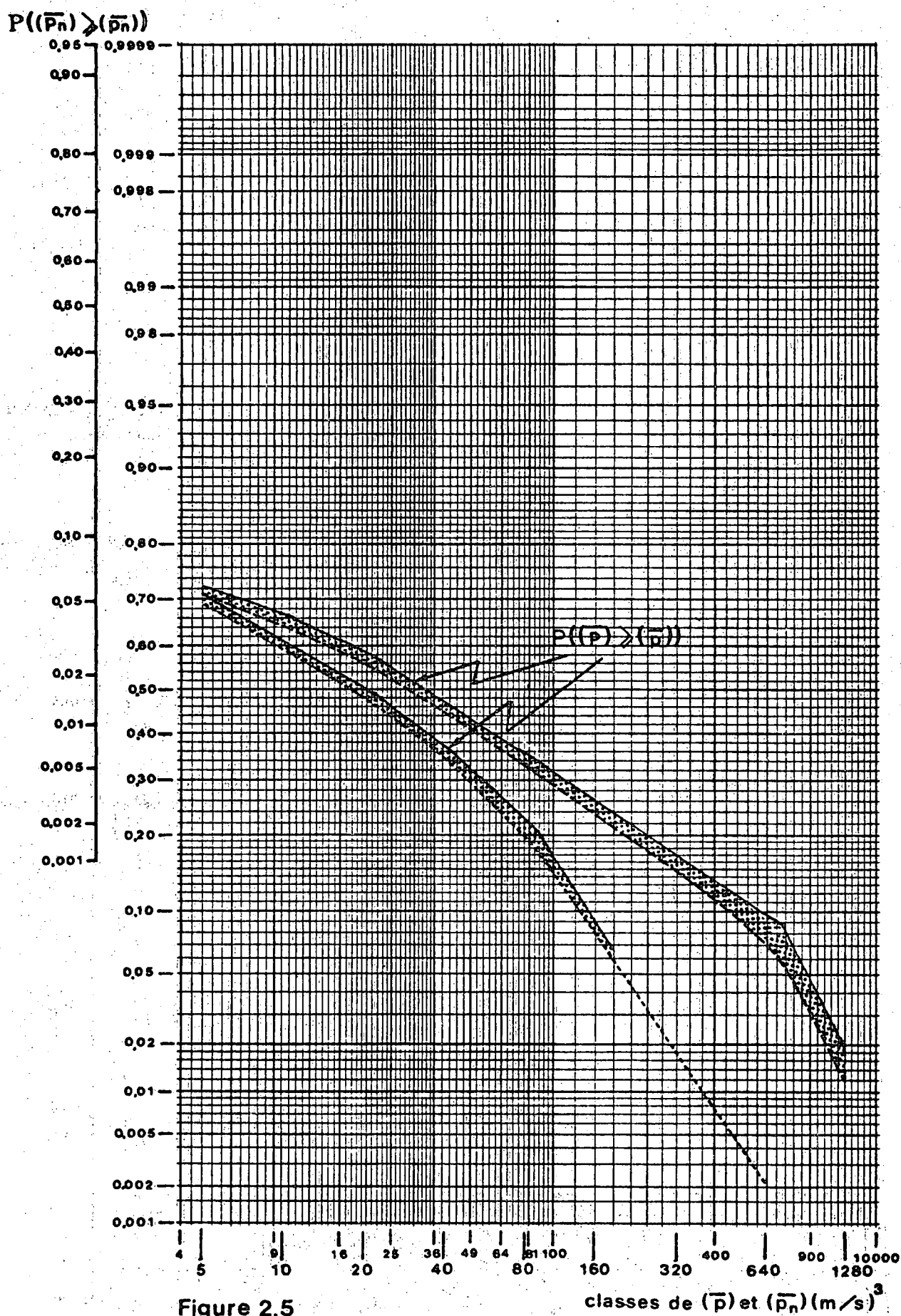


Figure 2.5

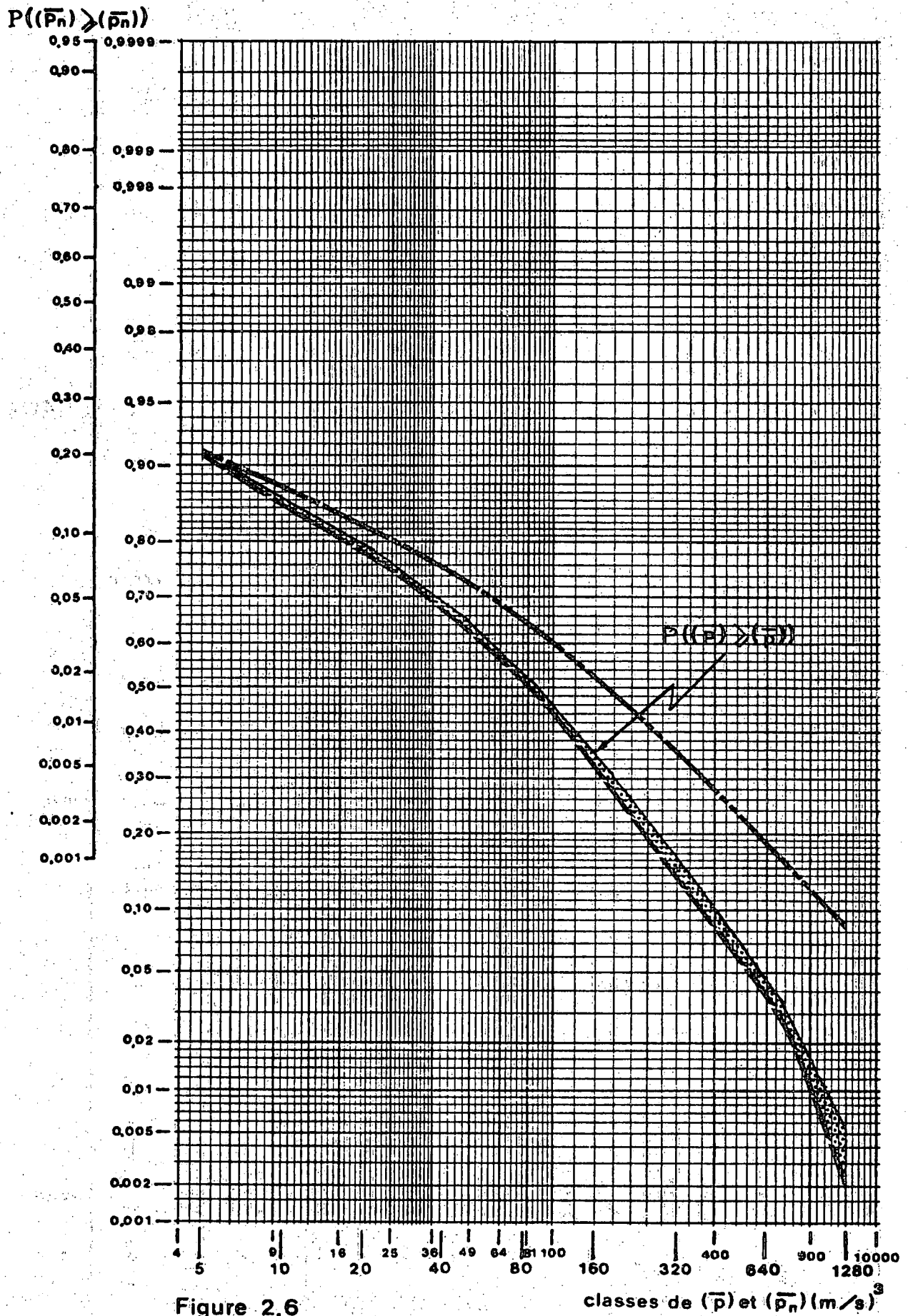
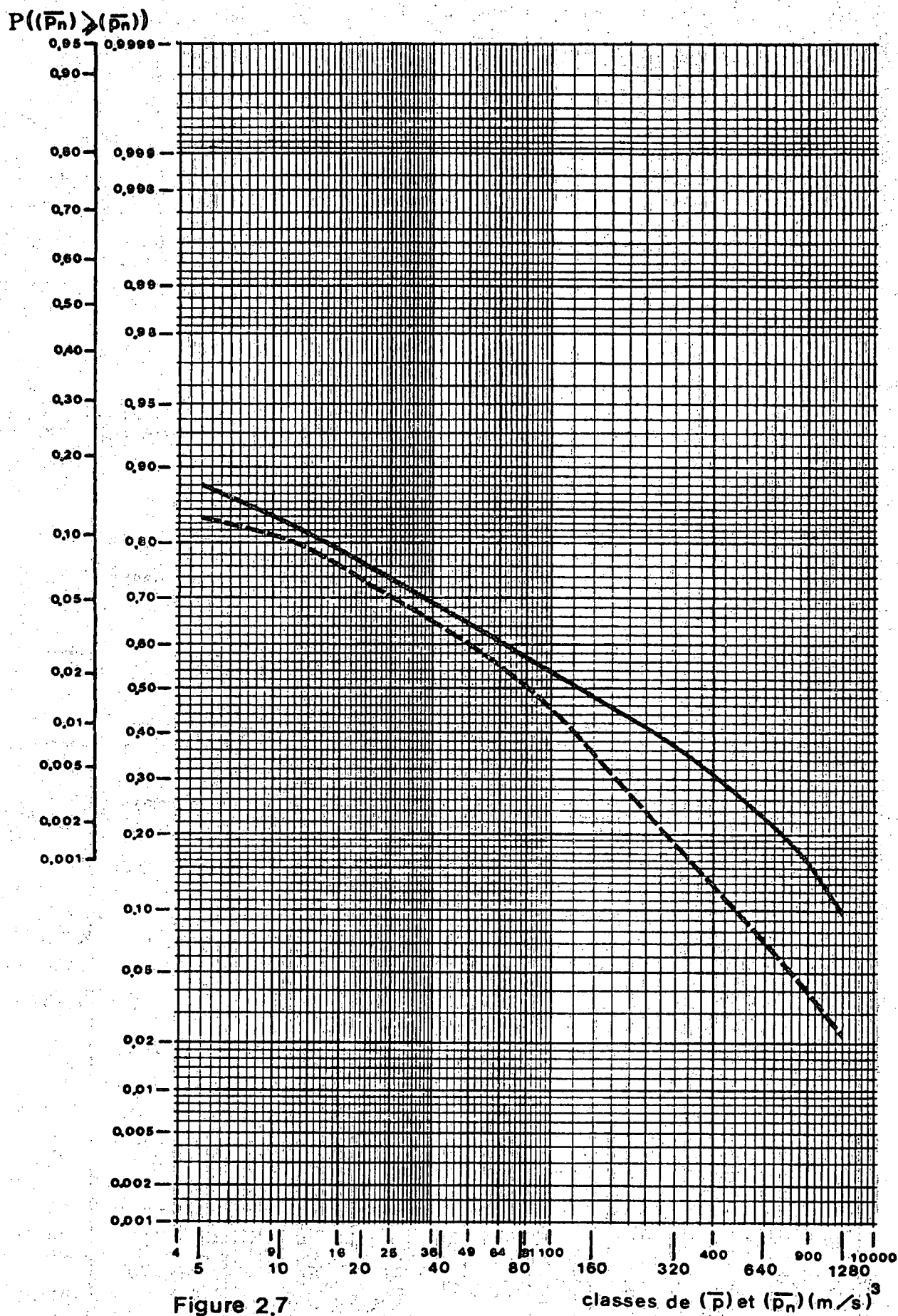
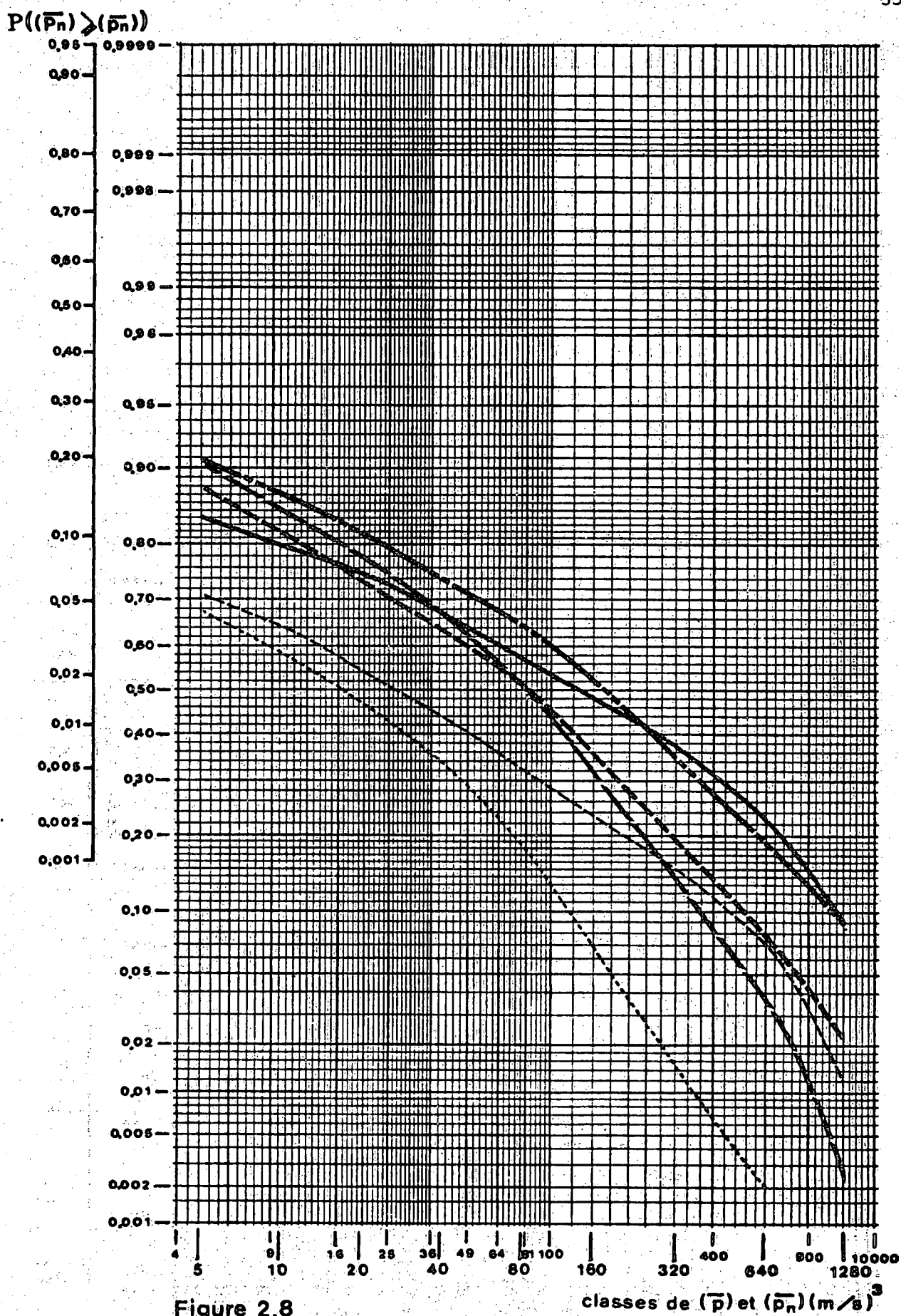


Figure 2.6

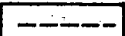


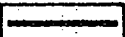


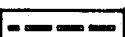
Figures 2.9 à 2.13 : Idem figures 2.4 à 2.8 pour le jour et pour la nuit.

La seconde échelle à gauche indique la probabilité pour la nuit.

SJUU15  Station Ste-Agathe du 25 juin au 9 juillet 1976

SJAN15  Station Ste-Agathe du 1^{er} au 15 janvier 1978

IMAA15  Station Sept-Iles du 24 mars au 7 avril 1976

IJAN15  Station Sept-Iles du 1^{er} au 15 janvier 1976

DOCT15  Station Dorval du 1^{er} au 15 octobre 1978

DJAN15  Station Dorval du 1^{er} au 15 janvier 1976

 erreur systématique due au lissage

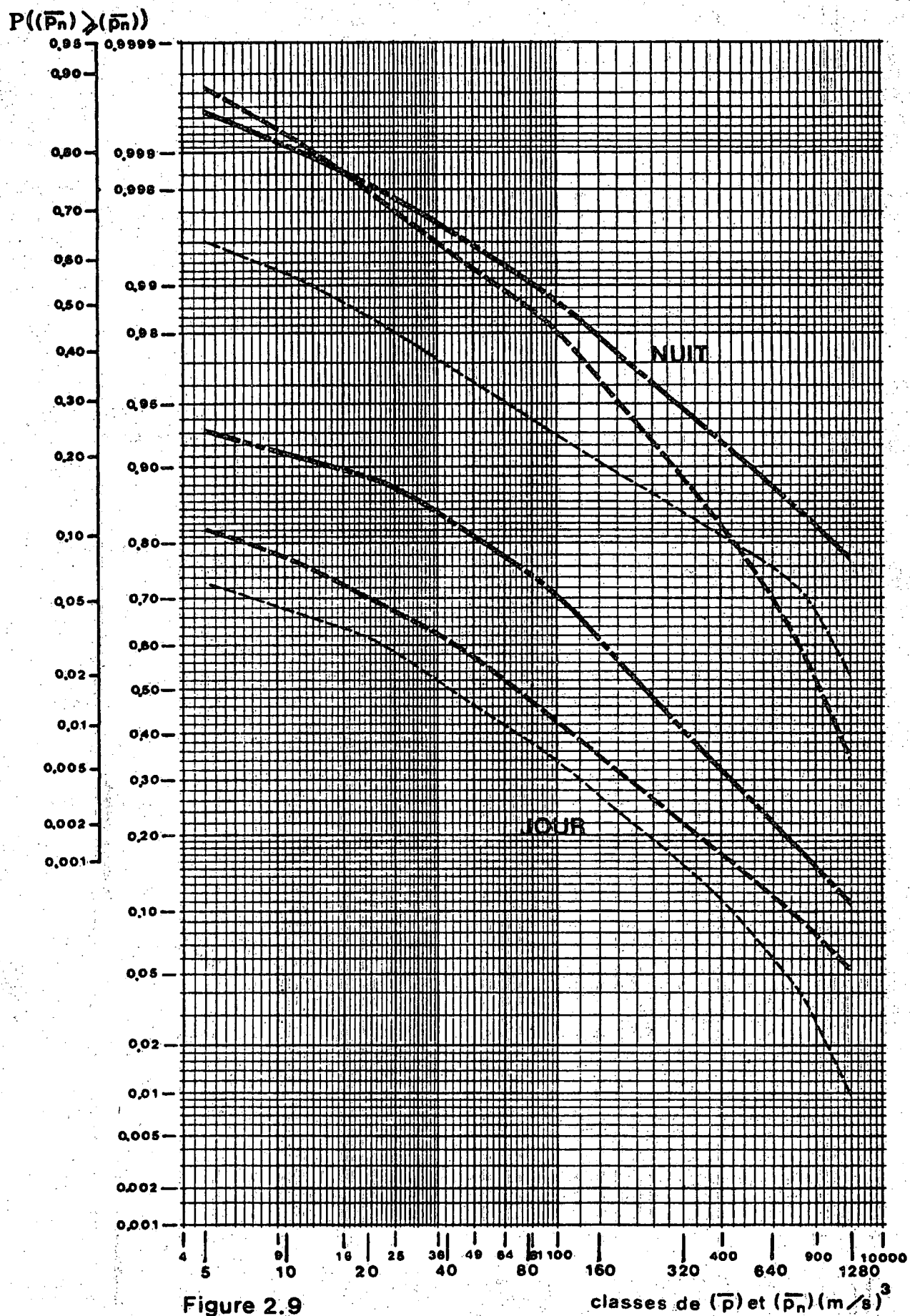


Figure 2.9

classes de $(\bar{p})$ et $(\bar{p}_n)$ (m/s)³

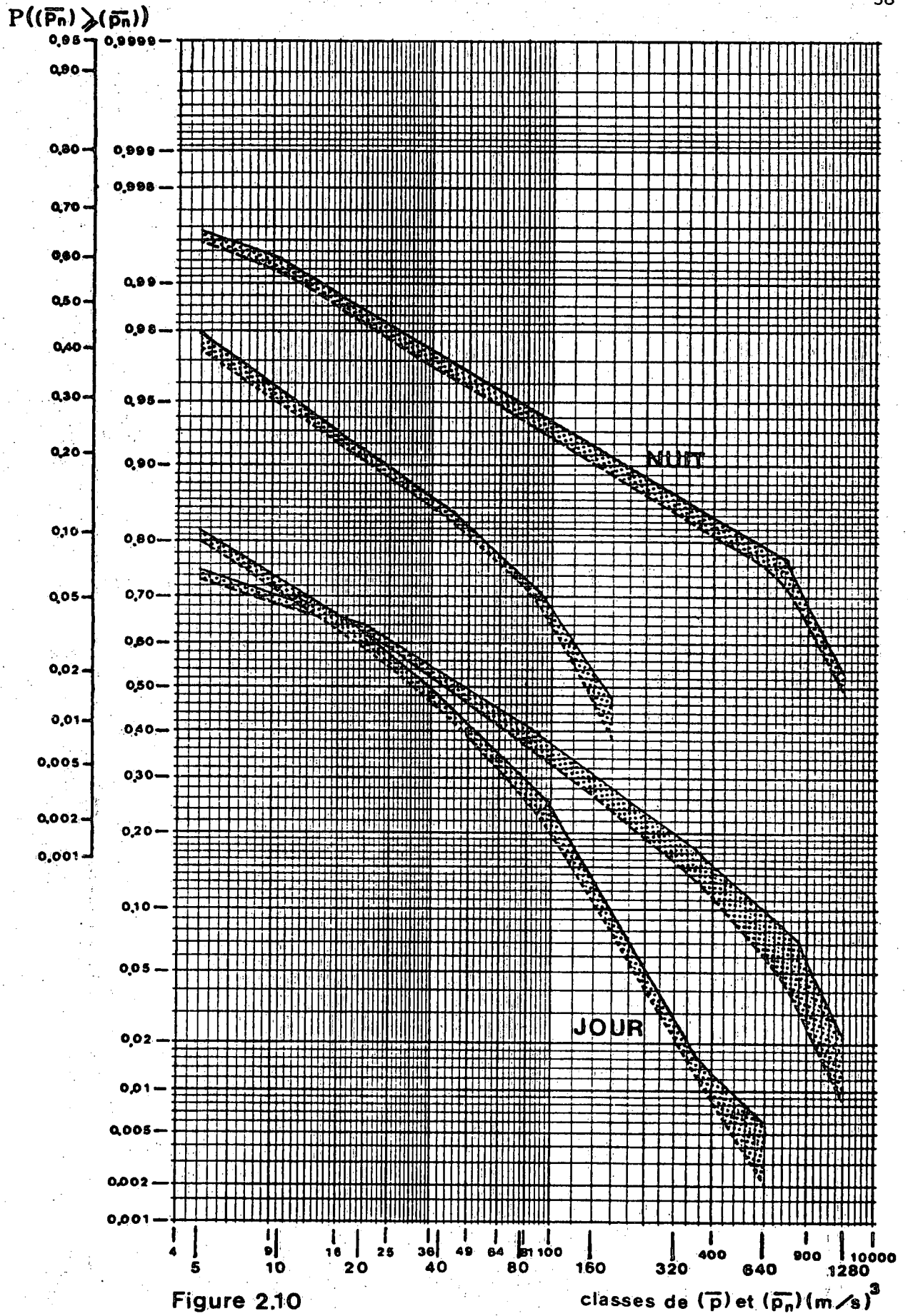


Figure 2.10

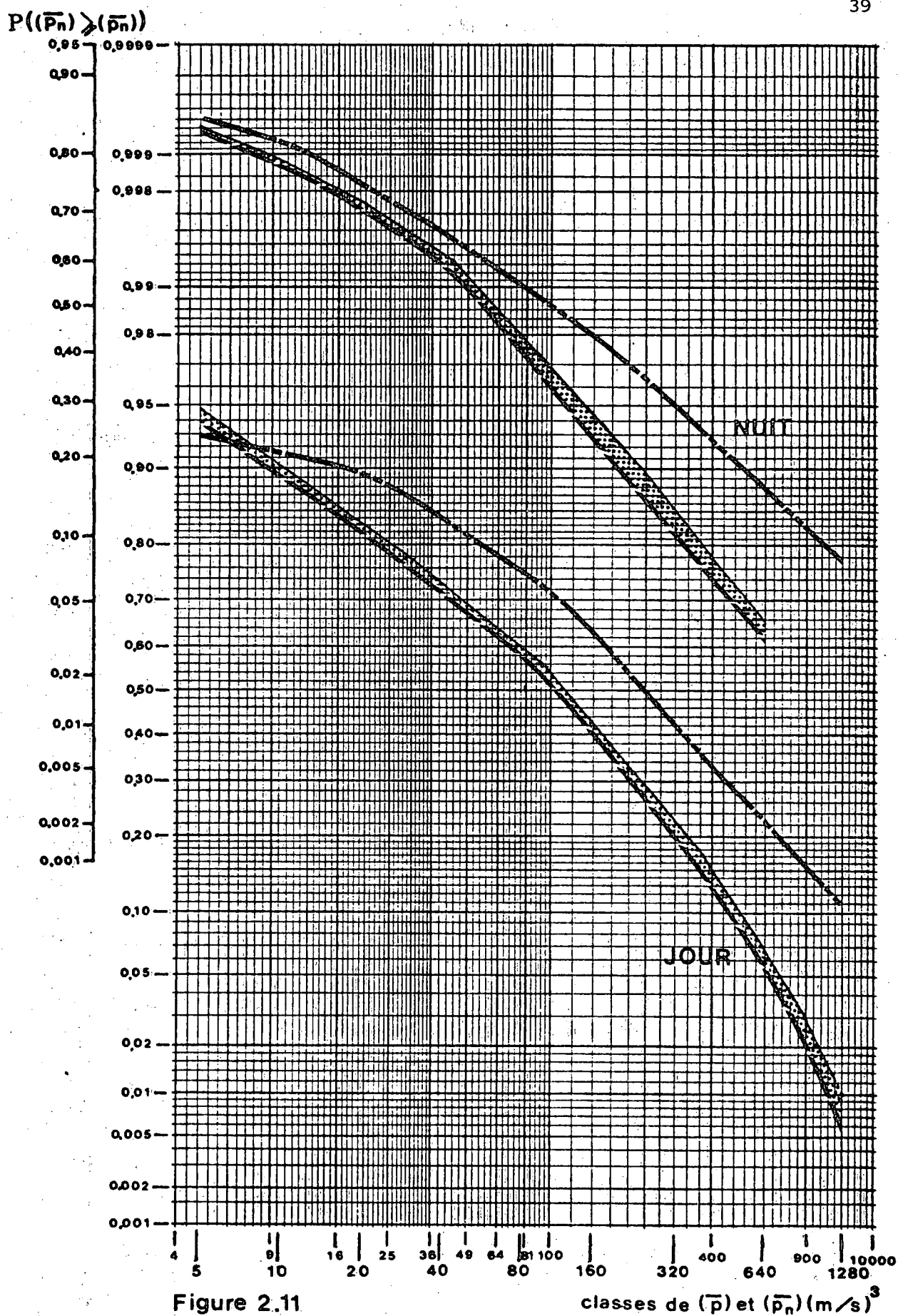


Figure 2.11

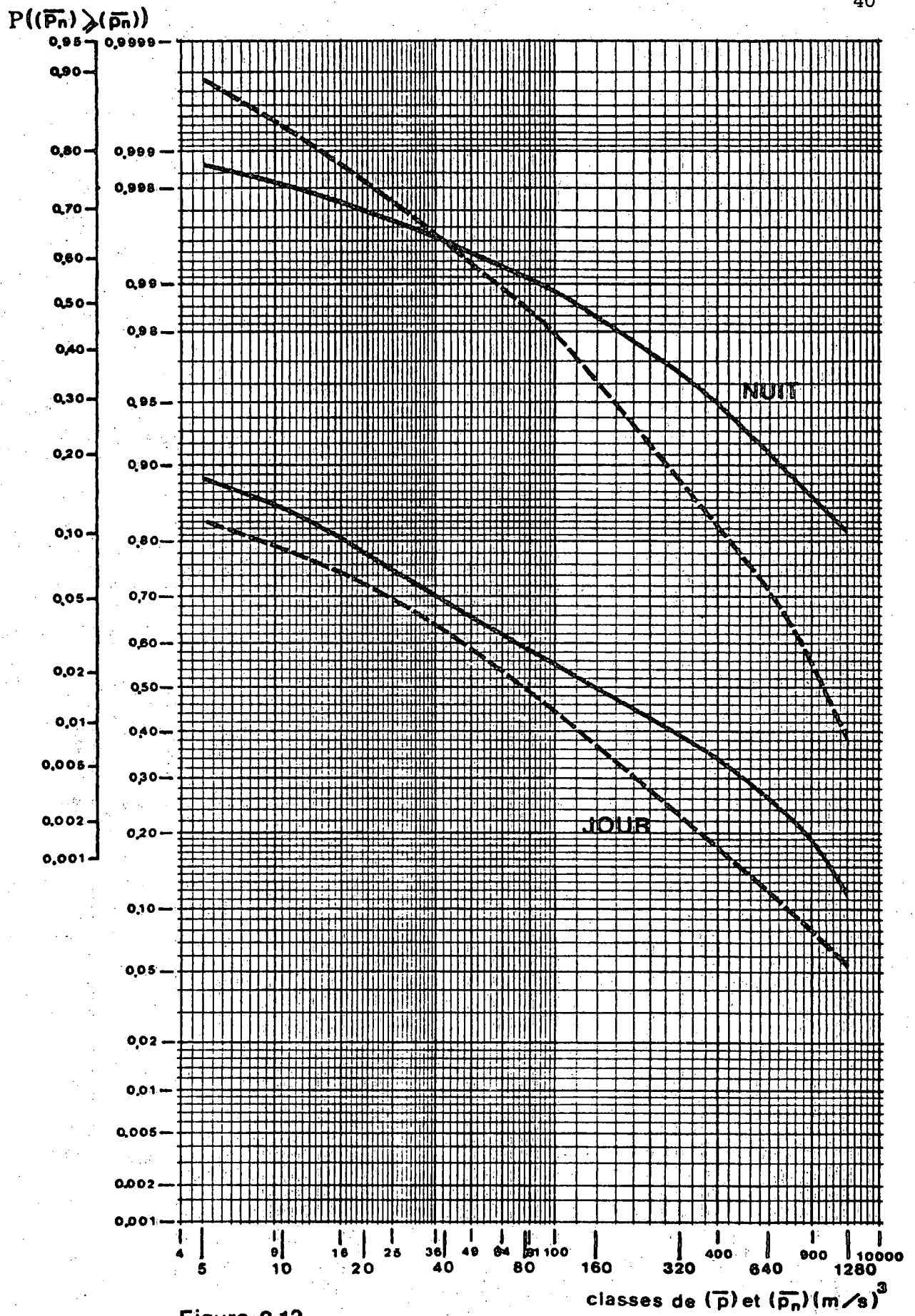


Figure 2.12

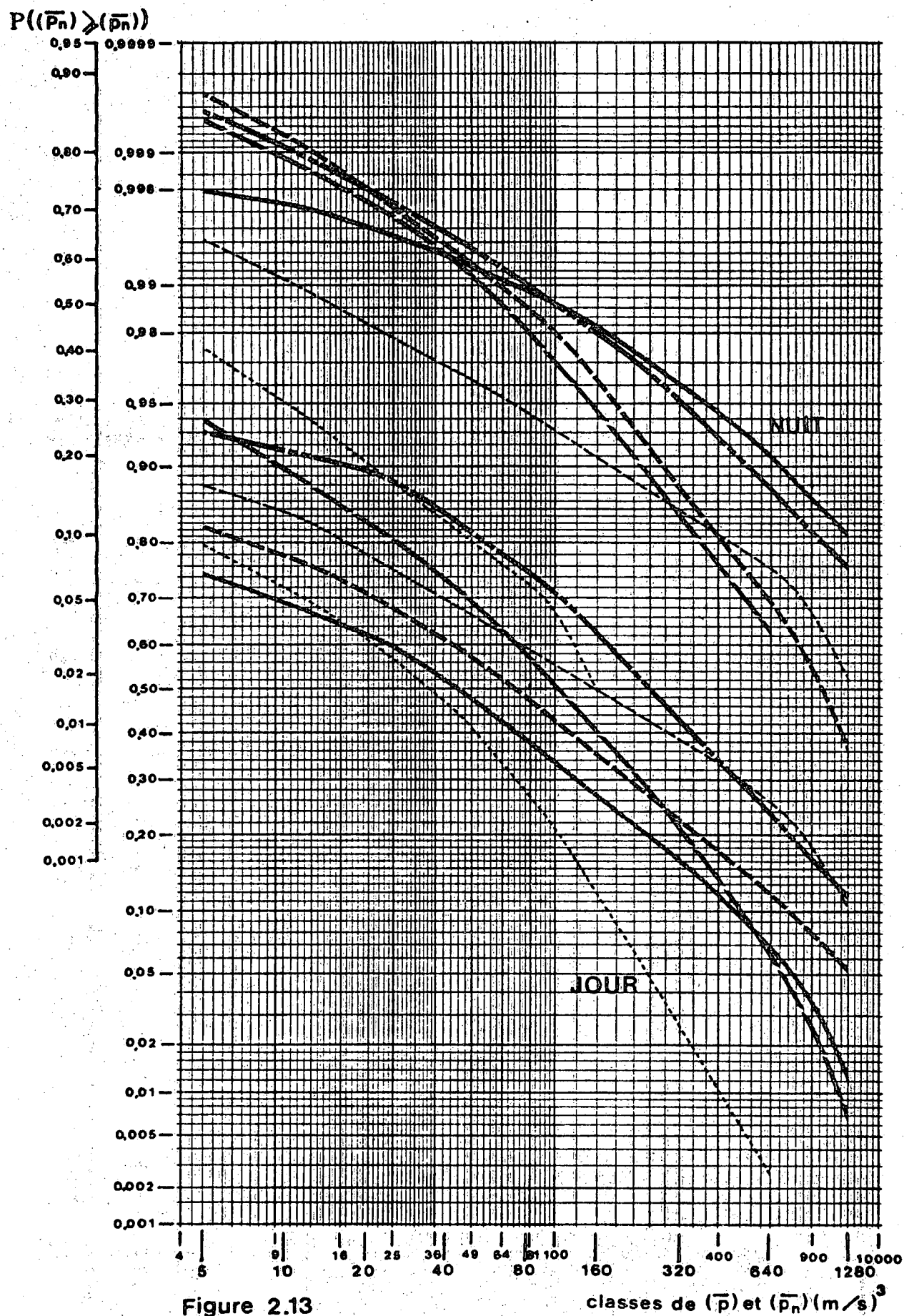


Figure 2.13

classes de $(\bar{p})$ et $(\bar{p}_n)$ (m/s)³

Fichier	pente	OR.OR.	Coeff. COR.	N
DJAN15				
DOCT15	1.089	-2.687	0.997	3600
SJAN15	1.175	0.152	0.988	3600
SJUU15	1.119	-0.926	0.994	3600
IJAN15				
IMAA15				
DJAN15	1.034	-0.182	0.999	1800
DOCT15	1.107	-2.926	0.997	1800
SJAN15	1.223	-0.271	0.989	1800
SJUU15	1.152	-0.868	0.993	1800
IJAN15	1.062	-1.845	0.999	1800
IMAA15	1.042	-0.555	0.999	1800

Tableau 2.1 : Statistiques résultant de la relation entre la puissance éolienne moyenne $(\bar{p}_n) \propto \bar{V}_n^3$ et $(\bar{p}) \propto \bar{V}^3$ calculée pour 6 et 12 minutes correspondant à des périodes échantillonnales de 24 heures.

OR.OR. = ordonnée à l'origine

Coeff. Cor. = coefficient de corrélation simple.

N = le nombre d'observations.

fichier	pen	OR. OR.	COR.		N
DJAN15	1.031	-1.243	0.999		1350
DOCT15	1.083	-1.560	0.996		1650
SJAN15	1.220	-4.732	0.980	6 min.	1350
SJUN15	1.121	-1.211	0.993	(jour)	2400
IJAN15					
IMAA15					
DJAN15	1.024	0.203	0.999		2250
DOCT15	1.099	-3.728	0.996		1950
SJAN15	1.154	1.951	0.992	6 min.	2250
SJUN15	1.089	-0.151	0.994	(nuit)	1200
IJAN15					
IMAA15					
DJAN15	1.038	-1.079	0.998		675
DOCT15	1.100	-1.623	0.996		825
SJAN15	1.262	-3.485	0.980	12 min.	675
SJUN15	1.156	-1.121	0.992	(jour)	1200
IJAN15	1.063	-1.964	0.998		675
IMAA15	1.037	1.501	0.998		825
DJAN15	1.031	0.413	0.999		1125
DOCT15	1.117	-4.027	0.997		975
SJAN15	1.204	0.774	0.993	12 min.	1125
SJUN15	1.112	-0.030	0.994	(nuit)	600
IJAN15	1.055	-0.838	0.998		1125
IMAA15	1.045	-1.645	0.999		975

Tableau 2.2 : Idem tableau 2.1, pour le jour et pour la nuit.

fichier	pente (12 min.) (a)	pente (60 min.) (a')	(a' - a)	
DJAN15	1.034	1.038	0.064	24 heures
DOCT15	1.107	1.122	0.015	
SJAN15	1.223	1.276	0.053	
SJUJ15	1.152	1.198	0.046	
IJAN15	1.062	1.073	0.011	
IMAA15	1.042	1.048	0.006	
DJAN15	1.038	1.039	0.001	jour
DOCT15	1.100	1.111	0.011	
SJAN15	1.262	1.410	0.148	
SJUJ15	1.156	1.200	0.044	
IJAN15	1.063	1.067	0.004	
IMAA15	1.037	1.049	0.012	
DJAN15	1.031	1.034	0.003	nuit
DOCT15	1.117	1.123	0.006	
SJAN15	1.204	1.256	0.052	
SJUJ15	1.112	1.123	0.011	
IJAN15	1.055	1.080	0.025	
IMAA15	1.045	1.046	0.001	

Tableau 2.2.1 : Différentes pentes des droites de meilleure régression associées au lissage des données de la vitesse du vent pour des périodes de lissage de 12 minutes et 60 minutes.

Classes de $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ (m/s) ³	Effectif $(\bar{p}_n)$	Effectif $(\bar{p})$	$P(\bar{p}_n)$	$P(\bar{p})$	$P((\bar{p}_n) \geq (\bar{p}_n))$	$P((\bar{p}) \geq (\bar{p}))$	e
SJÜJ15							
0-4.99	571	538	0.317	0.299	0.683	0.701	0.026
5-9.99	174	158	0.414	0.387	0.586	0.613	0.044
10-19.99	190	208	0.520	0.502	0.481	0.498	0.034
20-39.99	244	238	0.655	0.635	0.345	0.365	0.055
40-79.99	274	268	0.807	0.783	0.193	0.217	0.111
80-159.99	229	242	0.935	0.918	0.065	0.082	0.207
160-319.99	96	122	0.988	0.986	0.012	0.014	0.143
320-639.99	19	20	0.998	0.997	0.002	0.003	0.333
640-1279.99	3	6	1.000	1.000	0.000	0.000	
1280 et plus							
SJAN15							
0-4.99	528	503	0.293	0.279	0.707	0.721	0.019
5-9.99	112	104	0.356	0.337	0.644	0.663	0.029
10-19.99	153	168	0.441	0.431	0.559	0.569	0.018
20-39.99	213	196	0.559	0.539	0.441	0.461	0.043
40-79.99	217	203	0.679	0.652	0.321	0.348	0.103
80-159.99	189	202	0.784	0.764	0.216	0.236	0.085
160-319.99	125	128	0.854	0.836	0.146	0.164	0.110
320-639.99	141	128	0.932	0.907	0.068	0.093	0.269
640-1279.99	108	145	0.992	0.987	0.008	0.013	0.385
1280 et plus	14	23	1.000	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.3 : Distributions d'effectifs et de probabilités cumulées associées à différentes classes de puissances éoliennes moyennes $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ calculées pour 12 minutes correspondant à des périodes échantillonnales de 24 heures pour la station Ste-Agathe entre le 25 juin et le 9 juillet 1976 (SJÜJ15) et du 1^e au 15 janvier 1978 (SJAN15).

Classes de (p_i) (m/s) ³	Effectif (p_i)	$P(p_i)$	$P((P_i) \geq (p_i))$	$P((\bar{P}) \geq (\bar{p}))$	e'
SJUI15					
0-4.99	5863	0.326	0.674	0.701	0.039
5-9.99	1658	0.418	0.582	0.613	0.051
10-19.99	1844	0.520	0.480	0.498	0.036
20-39.99	2652	0.667	0.333	0.365	0.088
40-79.99	2465	0.804	0.196	0.217	0.097
80-159.99	1977	0.914	0.086	0.082	-0.049
160-319.99	1099	0.975	0.025	0.014	-0.786
320-639.99	353	0.995	0.005	0.003	-0.667
640-1279.99	72	0.999	0.001	0.000	
1280 et plus	17	1.000	0.000		
SJAN15					
0-4.99	5380	0.299	0.701	0.721	0.028
5-9.99	1335	0.373	0.627	0.663	0.054
10-19.99	1528	0.458	0.542	0.569	0.047
20-39.99	2108	0.575	0.425	0.461	0.078
40-79.99	1907	0.681	0.319	0.348	0.083
80-159.99	1877	0.785	0.215	0.236	0.089
160-319.99	1482	0.867	0.133	0.164	0.189
320-639.99	1054	0.926	0.074	0.093	0.204
640-1279.99	803	0.971	0.029	0.013	-1.231
1280 et plus	526	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.3.1 : Distributions d'effectifs et de probabilités cumulées associées à différentes classes de puissances éoliennes (p_i) calculées à chaque 72 secondes correspondant à des périodes échantillonales de 24 heures pour la station Ste-Agathe entre le 25 juin et le 9 juillet 1976 (SJUI15) et du 1^e au 15 janvier 1978 (SJAN15).

Classe de $(\bar{P}_n)$ et $(\bar{p})$ (m/s) ³	Effectif $(\bar{p}_n)$	Effectif $(\bar{p})$	$P(\bar{p}_n)$	$P(\bar{p})$	$P((\bar{P}_n) \geq (\bar{p}_n))$	$P((\bar{P}) \geq (\bar{p}))$	e
DOCT15							
0-4.99	171	153	0.095	0.085	0.905	0.915	0.011
5-9.99	96	96	0.148	0.138	0.852	0.862	0.012
10-19.99	116	121	0.213	0.206	0.787	0.794	0.009
20-39.99	204	201	0.326	0.317	0.674	0.683	0.013
40-79.99	304	292	0.495	0.479	0.505	0.521	0.031
80-159.99	354	340	0.692	0.668	0.308	0.332	0.072
160-319.99	322	337	0.871	0.856	0.129	0.144	0.104
320-639.99	169	184	0.964	0.958	0.036	0.042	0.143
640-1279.99	62	70	0.999	0.997	0.001	0.003	0.667
1280 et plus	2	6	1.000	1.000	0.000	0.000	
DJAN15							
0-4.99	175	170	0.097	0.094	0.903	0.906	0.003
5-9.99	55	50	0.128	0.122	0.872	0.878	0.007
10-19.99	91	91	0.178	0.173	0.822	0.827	0.006
20-39.99	140	140	0.256	0.251	0.744	0.749	0.007
40-79.99	195	199	0.365	0.361	0.635	0.639	0.006
80-159.99	234	231	0.495	0.490	0.505	0.510	0.010
160-319.99	313	310	0.668	0.662	0.332	0.338	0.018
329-639.99	323	322	0.848	0.841	0.152	0.159	0.044
640-1279.99	133	137	0.922	0.917	0.078	0.083	0.060
1280 et plus	141	150	1.000	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.4 : Idem tableau 2.3 pour la station Dorval entre le 1^e et le 15 octobre 1978 (DOCT15) et du 1^e au 15 janvier 1976 (DJAN15).

Classes de (p_i) (m/s) ³	Effectif (p_i)	$P(p_i)$	$P((P_i) \geq (p_i))$	$P((\bar{P}) \geq (\bar{p}))$	e'
DOCT15					
0-4.99	1738	0.097	0.903	0.915	0.013
5-9.99	929	0.149	0.851	0.862	0.013
10-19.99	1187	0.215	0.785	0.794	0.011
20-39.99	2250	0.340	0.660	0.683	0.034
40-79.99	2974	0.505	0.495	0.521	0.050
80-159.99	3405	0.694	0.306	0.332	0.078
160-319.99	2999	0.861	0.139	0.144	0.035
320-639.99	1671	0.954	0.046	0.042	-0.004
640-1279.99	657	0.991	0.009	0.003	-2.000
1280 et plus	190	1.000	0.000	0.000	
DJAN15					
0-4.99	1855	0.103	0.897	0.906	0.010
5-9.99	468	0.129	0.871	0.878	0.008
10-19.99	784	0.173	0.827	0.827	0.000
20-39.99	1480	0.255	0.745	0.749	0.005
40-79.99	1944	0.363	0.637	0.639	0.003
80-159.99	2327	0.492	0.508	0.510	0.004
160-319.99	3340	0.678	0.322	0.338	0.047
320-639.99	2881	0.838	0.162	0.159	-0.019
640-1279.99	1537	0.923	0.077	0.083	0.072
1280 et plus	1384	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.4.1 : Idem tableau 2.3.1 pour la station Dorval entre le 1^{er} et le 15 octobre 1978 (DOCT15)
et du 1^{er} au 15 janvier 1976 (DJAN15)

Classe de $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ (m/s) ³	Effectif $(\bar{p}_n)$	Effectif $(\bar{p})$	$P(\bar{p}_n)$	$P(\bar{p})$	$P((\bar{p}_n) \geq (\bar{p}_n))$	$P((\bar{p}) \geq (\bar{p}))$	e
IMAA15							
0-4.99	285	277	0.158	0.154	0.842	0.846	0.005
5-9.99	59	63	0.191	0.189	0.809	0.811	0.002
10-19.99	118	115	0.257	0.253	0.743	0.747	0.005
20-39.99	149	151	0.340	0.337	0.660	0.663	0.005
40-79.99	141	138	0.418	0.413	0.582	0.587	0.009
80-159.99	191	190	0.524	0.519	0.476	0.481	0.010
160-319.99	207	209	0.639	0.635	0.361	0.365	0.011
320-639.99	259	253	0.783	0.775	0.217	0.225	0.036
640-1279.99	257	250	0.926	0.915	0.074	0.085	0.129
1280 et plus	134	154	1.000	1.000	0.000	0.000	
IJAN15							
0-4.99	221	211	0.123	0.117	0.877	0.883	0.007
5-9.99	86	85	0.171	0.164	0.829	0.836	0.008
10-19.99	165	164	0.262	0.256	0.738	0.744	0.008
20-39.99	181	181	0.363	0.356	0.637	0.644	0.011
40-79.99	260	266	0.507	0.504	0.493	0.496	0.006
80-159.99	334	325	0.693	0.685	0.307	0.315	0.025
160-319.99	237	237	0.825	0.816	0.175	0.184	0.049
320-639.99	192	191	0.931	0.922	0.069	0.078	0.115
640-1279.99	91	106	0.982	0.981	0.018	0.019	0.053
1280 et plus	33	34	1.000	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.5 : Idem tableau 2.3 pour la station Sept-Iles entre le 25 mars et le 7 avril 1976 (IMAA15) et du 1^e au 15 janvier 1976 (IJAN15).

Classes de (p_i) (m/s) ³	Effectif (p_i)	$P(p_i)$	$P((P_i) \geq (p_i))$	$P((\bar{P}) \geq (\bar{p}))$	e'
TMAA15					
0-4.99	2811	0.156	0.844	0.846	0.002
5-9.99	653	0.192	0.808	0.811	0.004
10-19.99	1036	0.250	0.750	0.747	-0.004
20-39.99	1570	0.337	0.663	0.663	0.000
40-79.99	1520	0.421	0.579	0.587	0.014
80-159.99	1821	0.522	0.478	0.481	0.006
160-319.99	2271	0.648	0.352	0.365	0.036
320-639.99	2397	0.781	0.219	0.225	0.027
640-1279.99	2427	0.916	0.084	0.085	0.012
1280 et plus	1494	1.000	0.000	0.000	
IJAN15					
0-4.99	2212	0.123	0.877	0.883	0.007
5-9.99	932	0.175	0.825	0.836	0.013
10-19.99	1402	0.253	0.747	0.744	-0.004
20-39.99	2061	0.368	0.633	0.644	0.017
40-79.99	2598	0.512	0.488	0.496	0.016
80-159.99	3264	0.693	0.307	0.315	0.025
160-319.99	2379	0.825	0.175	0.184	0.049
320-639.99	1799	0.925	0.075	0.078	0.038
640-1279.99	964	0.979	0.021	0.019	-0.105
1280 et plus	389	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.5.1 : Idem tableau 2.3.1 pour la station Sept-Iles entre le 25 mars et le 7 avril 1976 (TMAA15) et du 1^e au 15 janvier 1976 (IJAN15).

Classes de $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ (m/s) ³	Effectif $(\bar{p}_n)$	Effectif $(\bar{p})$	$P(\bar{p}_n)$	$P(\bar{p})$	$P((\bar{p}_n) \geq (\bar{p}_n))$	$P((\bar{p}) \geq (\bar{p}))$	e
SJUU15							
0-4.99	243	227	0.203	0.189	0.797	0.811	0.017
5-9.99	101	85	0.287	0.260	0.713	0.740	0.036
10-19.99	122	133	0.388	0.371	0.612	0.629	0.027
20-39.99	197	186	0.553	0.526	0.447	0.474	0.057
40-79.99	229	220	0.743	0.709	0.257	0.291	0.117
80-159.99	197	212	0.908	0.886	0.092	0.114	0.193
160-139.99	89	111	0.982	0.978	0.018	0.022	0.182
320-639.99	20	19	0.999	0.994	0.001	0.006	0.833
640-1279.99	2	7	1.000	1.000	0.000	0.000	
1280 et plus							
SJAN15							
0-4.99	172	167	0.255	0.247	0.745	0.753	0.011
5-9.99	37	27	0.310	0.287	0.690	0.713	0.032
10-19.99	43	56	0.373	0.370	0.627	0.630	0.005
20-39.99	76	68	0.486	0.471	0.514	0.529	0.028
40-79.99	80	80	0.604	0.590	0.396	0.410	0.034
80-159.99	92	86	0.741	0.717	0.259	0.283	0.085
160-319.99	70	65	0.844	0.813	0.156	0.187	0.166
320-639.99	69	66	0.947	0.911	0.053	0.089	0.404
640-1279.99	33	52	0.996	0.988	0.004	0.012	0.667
1280 et plus	3	8	1.000	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.6 : Distributions d'effectifs et de probabilités cumulées associées à différentes classes de puissances éoliennes moyennes $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ calculées pour 12 minutes durant le jour pour la station Ste-Agathe entre le 25 juin et le 9 juillet 1976 (SJUU15) et du 15 janvier 1978 (SJAN15).

Classes de $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ (m/s) ³	Effectif $(\bar{p}_n)$	Effectif $(\bar{p})$	$P(\bar{p}_n)$	$P(\bar{p})$	$P((\bar{p}_n) \geq (\bar{p}_n))$	$P((\bar{p}) \geq (\bar{p}))$	e
DOCT15							
0-4.99	50	39	0.061	0.047	0.939	0.953	0.015
5-9.99	41	41	0.110	0.097	0.890	0.903	0.014
10-19.99	51	54	0.172	0.163	0.828	0.837	0.011
20-39.99	88	91	0.279	0.273	0.721	0.727	0.008
40-79.99	116	108	0.419	0.404	0.581	0.596	0.025
80-159.99	151	140	0.602	0.573	0.398	0.427	0.068
160-319.99	176	183	0.816	0.795	0.184	0.205	0.102
320-629.99	115	124	0.955	0.946	0.045	0.054	0.167
640-1279.99	35	40	0.998	0.994	0.002	0.006	0.667
1280 et plus	2	5	1.000	1.000	0.000	0.000	
DJAN15							
0-4.99	45	43	0.067	0.063	0.933	0.937	0.004
5-9.99	12	8	0.085	0.076	0.915	0.924	0.010
10-19.99	14	18	0.105	0.102	0.895	0.898	0.003
20-39.99	45	44	0.172	0.168	0.828	0.832	0.005
40-79.99	58	59	0.258	0.255	0.742	0.745	0.004
80-159.99	103	101	0.410	0.405	0.590	0.595	0.008
160-319.99	132	132	0.606	0.600	0.394	0.400	0.015
320-639.99	132	131	0.801	0.794	0.198	0.206	0.039
640-1279.99	72	70	0.908	0.898	0.091	0.102	0.108
1280 et plus	62	69	1.000	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.7 : Idem tableau 2.6 pour la station Dorval entre le 1e et le 15 octobre 1978 (DOCT15) et du 1e au 15 janvier 1976 (DJAN15).

Classes de $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ (m/s) ³	Effectif $(\bar{p}_n)$	Effectif $(\bar{p})$	$P(\bar{p}_n)$	$P(\bar{p})$	$P((\bar{p}_n) \geq (\bar{p}_n))$	$P((\bar{p}) \geq (\bar{p}))$	e
IMAA15							
0-4.99	117	113	0.120	0.116	0.880	0.884	0.005
5-9.99	34	35	0.155	0.152	0.845	0.848	0.004
10-19.99	83	81	0.240	0.235	0.760	0.765	0.007
20-39.99	89	90	0.331	0.327	0.669	0.673	0.006
40-79.99	84	85	0.418	0.414	0.582	0.586	0.007
80-159.99	102	99	0.522	0.516	0.478	0.484	0.012
160-319.99	97	99	0.622	0.617	0.378	0.383	0.013
320-639.99	138	137	0.763	0.758	0.237	0.242	0.021
640-1279.99	167	161	0.934	0.923	0.066	0.077	0.143
1280 et plus	64	75	1.000	1.000	0.000	0.000	
IJAN15							
0-4.99	115	110	0.170	0.163	0.830	0.837	0.008
5-9.99	29	31	0.213	0.209	0.787	0.791	0.005
10-19.99	51	51	0.289	0.285	0.711	0.715	0.006
20-39.99	65	67	0.385	0.384	0.615	0.616	0.002
40-79.99	101	100	0.535	0.532	0.465	0.468	0.006
80-159.99	89	87	0.667	0.661	0.333	0.339	0.018
160-319.99	88	89	0.797	0.793	0.203	0.207	0.019
320-639.99	62	58	0.889	0.879	0.111	0.121	0.083
640-1279.99	45	52	0.956	0.956	0.044	0.044	0.000
1280 et plus	30	30	1.000	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.8 : Idem tableau 2.6 pour la station Sept-Iles entre le 24 mars et le 7 avril 1976 (IMAA15) et du 1^e au 15 janvier 1976 (IJAN15).

Classes de $(\bar{P}_n)$ et $(\bar{P})$ (m/s) ³	Effectif $(\bar{P}_n)$	Effectif $(\bar{P})$	$P(\bar{P}_n)$	$P(\bar{P})$	$P((\bar{P}_n) \geq (\bar{P}_n))$	$P((\bar{P}) \geq (\bar{P}))$	e
SJUU15							
0-4.99	328	311	0.547	0.518	0.453	0.482	0.060
5-9.99	73	73	0.668	0.640	0.332	0.360	0.078
10-19.99	68	75	0.782	0.765	0.218	0.235	0.072
20-39.99	48	52	0.862	0.852	0.138	0.148	0.068
40-79.99	44	48	0.935	0.932	0.065	0.068	0.044
80-159.99	32	30	0.988	0.982	0.012	0.018	0.333
160-319.99	7	11	1.000	1.000	0.000	0.000	
320-639.99							
640-1279.99							
1280 et plus							
SJAN15							
0-4.99	356	336	0.316	0.299	0.684	0.701	0.024
5-9.99	75	77	0.383	0.367	0.617	0.633	0.025
10-19.99	110	112	0.481	0.467	0.519	0.533	0.026
20-39.99	137	128	0.603	0.581	0.397	0.419	0.053
40-79.99	137	123	0.725	0.690	0.275	0.310	0.113
80-159.99	97	116	0.811	0.793	0.189	0.207	0.087
160-319.99	55	63	0.860	0.849	0.140	0.151	0.073
320-639.99	72	62	0.924	0.904	0.076	0.096	0.208
640-1279.99	75	93	0.990	0.987	0.010	0.013	0.231
1280 et plus	11	15	1.000	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.9 : Distributions d'effectifs et de probabilités cumulées associées à différentes classes de puissances éoliennes moyennes $(\bar{P}_n)$ et $(\bar{P})$ calculées pour 12 minutes durant la nuit pour la station Ste-Agathe entre le 25 juin et le 9 juillet 1976 (SJUU15) et du 15 janvier 1978 (SJAN15).

Classes de $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ (m/s) ³	Effectif $(\bar{p}_n)$	Effectif $(\bar{p})$	$P(\bar{p}_n)$	$P(\bar{p})$	$P((\bar{p}_n) \geq (\bar{p}_n))$	$P((\bar{p}) \geq (\bar{p}))$	e
DOCT15							
0-4.99	121	114	0.124	0.117	0.876	0.883	0.008
5-9.99	55	55	0.181	0.173	0.819	0.827	0.010
10-19.99	65	67	0.247	0.242	0.753	0.758	0.007
20-39.99	116	110	0.366	0.355	0.634	0.645	0.017
40-79.99	188	184	0.559	0.544	0.441	0.456	0.033
80-159.99	203	200	0.767	0.749	0.233	0.251	0.072
160-319.99	146	154	0.917	0.907	0.083	0.093	0.108
320-639.99	54	60	0.972	0.968	0.028	0.032	0.125
640-1279.99	27	30	1.000	0.999	0.000	0.001	1.000
1280 et plus		1		1.000		0.000	
DJAN15							
0-4.99	130	126	0.116	0.112	0.884	0.888	0.005
5-9.99	43	43	0.154	0.150	0.846	0.850	0.005
10-19.99	77	73	0.222	0.215	0.778	0.785	0.009
20-39.99	95	96	0.307	0.300	0.693	0.700	0.010
40-79.99	137	140	0.428	0.425	0.572	0.575	0.005
80-159.99	131	130	0.545	0.540	0.455	0.460	0.011
160-319.99	181	178	0.706	0.699	0.294	0.301	0.023
320-639.99	191	191	0.876	0.868	0.124	0.132	0.061
640-1279.99	61	67	0.930	0.928	0.070	0.072	0.028
1280 et plus	79	81	1.000	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.10 : Idem tableau 2.9 pour la station Dorval entre le 1^{er} et le 15 octobre 1978 (DOCT15) et du 1^{er} au 15 janvier 1976 (DJAN15).

Classes de $(\bar{p}_n)$ et $(\bar{p})$ $(m/s)^3$	Effectif $(\bar{p}_n)$	Effectif $(\bar{p})$	$P(\bar{p}_n)$	$P(\bar{p})$	$P((\bar{p}_n) \geq (\bar{p}_n))$	$P((\bar{p}) \geq (\bar{p}))$	e
IMAA15							
0-4.99	168	164	0.204	0.199	0.796	0.801	0.006
5-9.99	25	28	0.234	0.233	0.766	0.767	0.001
10-19.99	35	34	0.276	0.274	0.724	0.726	0.003
20-39.99	60	61	0.349	0.348	0.651	0.652	0.002
40-79.99	57	53	0.418	0.412	0.582	0.588	0.010
80-159.99	89	91	0.526	0.522	0.474	0.478	0.008
160-319.99	110	110	0.659	0.656	0.341	0.344	0.009
320-639.99	121	116	0.806	0.796	0.194	0.204	0.049
640-1279.99	90	89	0.915	0.904	0.085	0.096	0.115
1280 et plus	70	79	1.000	1.000	0.000	0.000	
IJAN15							
0-4.99	106	101	0.094	0.090	0.906	0.910	0.004
5-9.99	57	54	0.145	0.138	0.855	0.862	0.008
10-19.99	114	113	0.246	0.238	0.754	0.762	0.010
20-39.99	116	114	0.349	0.340	0.651	0.660	0.014
40-79.99	159	166	0.491	0.487	0.509	0.513	0.008
80-159.99	245	238	0.708	0.699	0.292	0.301	0.030
160-319.99	149	148	0.841	0.830	0.159	0.170	0.065
320-639.99	130	133	0.956	0.949	0.044	0.051	0.137
640-1279.99	46	54	0.997	0.997	0.003	0.003	0.000
1280 et plus	3	4	1.000	1.000	0.000	0.000	

Tableau 2.11 : Idem tableau 2.9 pour la station Sept-Iles entre le 24 mars et le 7 avril 1976 (IMAA15) et du 1^{er} au 15 janvier 1976 (IJAN15).

CHAPITRE 3. EFFETS D'ÉCHANTILLONNAGE SUR L'ESTIMATION DE LA PUISSANCE ÉOLIENNE

3.1 Erreur d'estimation de la puissance éolienne journalière (moyenne) due à l'échantillonnage

Puisque les données de vent prises aux stations météorologiques nous informent sur le vent horaire plutôt que sur le vent continu, il est important dans un premier temps de reconnaître et d'évaluer la perte d'information due à une sélection des données.

A partir des données digitalisées à toutes les 72 secondes aux trois stations (Dorval, Sept-Iles, Ste-Agathe) pour 2 périodes de 15 jours durant l'année, nous avons fait une première comparaison, comparaison d'abord directe entre les calculs de la puissance éolienne à partir des valeurs horaires ($p_h \propto v_h^3$) du vent et à partir des données digitalisées avec une résolution de 72 secondes ($p \propto v^3$).

Supposons que $V(t)$ soit la vitesse du vent en fonction du temps et V_h soit la valeur instantannée de $V(t)$ à l'heure h . la moyenne du potentiel éolien $p = \frac{1}{H} \int_0^H V^3 dt$ durant une période de temps $H = nh$ est :

$$p = \frac{1}{H} \int_{-H/2}^{H/2} v^3(t) dt$$

3.1

la valeur estimée à partir des échantillons V_h est :

$$p_h = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^n V_h^3 \quad (3.2)$$

l'intervalle de temps utilisé est de 24 heures i.e. qu'on obtient le potentiel éolien journalier moyen par deux méthodes, soit à partir des données continues du vent V et à partir des données horaires du vent V_h .

L'erreur quadratique moyenne de l'estimé peut donc être calculée et nous est donnée par

$$e^2 = \left(\overline{(p_h - p)^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

$$e = \left(\overline{p_h^2} \right)^{\frac{1}{2}} + \left(\overline{p^2} \right)^{\frac{1}{2}} - 2 \overline{p_h p} \quad (3.4)$$

En se servant des équations (3.1) et (3.2), nous avons obtenu dans un premier temps un calcul, et un estimé de la puissance éolienne journalière (moyenne) pour une période de 15 jours, soit 15 points de comparaison p, p_h . Nous avons ensuite calculé la moyenne mobile sur 24 heures à partir de toutes les données disponibles de la puissance éolienne pour en arriver à un total de 336 points de comparaison p, p_h soit 24 points par jour pendant 14 jours.

La figure 3.1 nous montre la comparaison entre p et p_h tel qu'obtenue par la méthode décrite plus haut pour Dorval

(du 1er au 15 janvier 1976).

Pour l'ensemble des fichiers ou la comparaison entre p et p_h s'établit, la pente de la droite de meilleure régression, le coefficient de corrélation et l'ordonnée à l'origine ont été calculés et les résultats apparaissent au tableau 3.1. L'écart de la droite de meilleure régression par rapport à la droite de 45° (pente = 1), nous permet d'évaluer l'erreur systématique due à l'échantillonnage, tandis que la dispersion des points autour de la droite nous informe de l'erreur aléatoire inhérente à l'échantillonnage.

La déviation maximale de la droite de meilleure régression est de 13% (pente = 1.13) dans le cas de Sept-Iles en janvier et la déviation minimale est de 1% (pente .99) pour Ste-Agathe en juin-juillet. Dans tous les cas sauf Sept-Iles en janvier, l'échantillonnage entraîne une surestimation de la puissance éolienne quotidienne puisqu'on obtient une pente inférieure à 1.

Il ne semble pas y avoir de raison particulière pour que Sept-Iles en janvier ne se comporte pas comme toutes les autres stations. En effet, si on se réfère au tableau 3.2, où apparaissent les puissances éoliennes maximales et minimales telles qu'évaluées par les deux méthodes déjà décrites, Sept-Iles ne représente nullement une station problème, la vitesse du vent étant du même ordre que pour les autres stations. Il en est de même pour le cas de Ste-Agathe en janvier où la pente est la plus faible. On peut donc conclure que l'échantillonnage peut produire une variation de

l'ordre de 10% en plus ou en moins par rapport à la valeur réelle de la puissance éolienne.

Quant à l'erreur aléatoire, elle nous est donnée par la dispersion des points autour de la droite de meilleure régression. Sur la figure 3.1, l'écart-type lié apparaît avec la droite de meilleure régression. Deux droites parallèles sont tracées de chaque côté de la droite de meilleure régression à un intervalle d'un écart-type lié. La largeur de cette bande nous renseigne sur l'erreur aléatoire due à l'échantillonnage. Dans tous les cas, la bande est très étroite, et si nous calculons les pentes minimale $M_{\min}$ et maximale $M_{\max}$ des droites insérées dans cette bande, nous observons une déviation de l'ordre de 10% par rapport à la pente de la droite de meilleure régression (m), i.e.

$$M_{\max} \text{ et } M_{\min} = M \pm .10$$

Puisque la pente M de la droite de meilleure régression est très voisine de 1, l'erreur aléatoire due à l'échantillonnage est donc de 10% ou moins dans tous les cas sauf pour Ste-Agathe en janvier où $M = .88$, et l'erreur se rapproche de 15%.

3.2 Fonction d'auto corrélation temporelle (FAC)

Il a été démontré par Zawadzki (1973) que l'erreur quadratique moyenne peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\frac{\sigma_e^2}{\sigma^2} = \frac{1}{n} \sum_{p=1-n}^{n-1} (n-|p|) a_p + \frac{1}{H^2} \int_{t=-H}^H (H-|t|) a(t) dt - \quad (3.5)$$

$$\frac{2}{nH} \sum_{p=1-n}^{n-1} (n-|p|) \int_{t=(|p|-\frac{1}{2})}^{(|p|+\frac{1}{2})} a(t) dt$$

où $a(t)$ est la fonction d'autocorrélation de p .

σ^2 est la variance de p

a_p est la FAC évalué sur le point p ($1h, 2h \dots nh$)

$H = nh$, période de temps

Donc, en évaluant la fonction d'auto-corrélation de p et la variance σ^2 , on peut déterminer les erreurs aléatoires de l'estimé de la puissance éolienne obtenue à partir des échantillons horaires. De la même façon les erreurs systématiques dues à l'échantillonnage pourront être étudiées à l'aide de la FAC (Zawadzki, 1976).

A partir des données disponibles aux stations météorologiques, seule une fonction d'autocorrélation de délai de 1 heure et plus, pourrait être obtenue, car les données sont disponibles aux heures. Dans les quelques cas où nous avons digitalisé les données du vent à toutes les 72 secondes, on peut étudier le comportement de la FAC pour les

délais beaucoup plus courts, en l'occurrence 72 secondes et comparer les résultats avec la FAC de délai 1 heure.

Dans un premier temps, nous avons donc calculé la FAC pour un délai allant de 72 secondes jusqu'à 3 heures, à intervalles de 72 secondes à partir de l'expression suivante :

$$FAC(K) = \frac{n-1}{n-K} \sum_{n=1}^{n-K} (x_n - Moy) (x_{n+K} - Moy)$$

où $K = 0, 72, 144, 216, \dots, 10,800$ secondes

n = nombre total de données, i.e. 18,000

que nous avons normalisée en divisant par la variance de p , i.e. $FAC(0)$. La fonction d'auto-corrélation normalisée obtenue avec des données au 72 secondes, sera appelée FACN72 de p . Nous avons donc obtenu 150 valeurs de la FAC dont la courbe apparaît sur les figures 3.2 à 3.7 pour chaque station utilisée avec la pente de la droite, l'ordonnée à l'origine et le coefficient de corrélation.

Dans tous les cas analysés, la FACN72 est une fonction linéaire de pente se situant entre $-.001$ et $-.002$, si l'on fait abstraction des 2 premiers points soit $k = 0$ et 72 secondes.

Dans les figures 3.8 à 3.13 apparaît la FAC de délai 1 heure jusqu'à 48 heures en utilisant la série complète de données et en prenant le vent horaire seulement. La fonction se comporte comme une exponentielle pour toutes les stations sauf Ste-Agathe où la puissance éolienne est beaucoup plus faible que les autres.

Pour Dorval (janvier et octobre) de même que Sept-iles (janvier, mars-avril), l'exponentielle s'applatit entre 20 heures et 30 heures de façon très claire alors qu'à Sept-Iles (mars-avril) on observe une oscillation dans la fin de l'exponentielle, relativement faible par rapport à la courbe. Le comportement de la fonction est donc très similaire dans ces quatre cas.

Dans le cas de Ste-Agathe, la fonction est vraiment différente des quatre autres cas. En janvier la fonction se comporte comme une droite de pente $-.01$ avec un coefficient de corrélation $-.81$ et en juillet, la fonction est exponentielle sur un intervalle de 20 heures, mais on retrouve un maximum à 25 heures avec une rechute et un second maximum après 50 heures; la courbe est exponentielle sauf que la période de la fonction périodique est plus courte que pour Dorval et Sept-Iles.

Lorsque nous avons calculé la FACN72, pour des délais allant de 72 secondes à 3 heures utilisant les données digitalisées au 72 secondes, nous avons constaté que la relation était linéaire. De plus, si l'on compare la FAC de délai 1 heure calculé avec des données au 72 secondes (FACN72 (1heure)) et celle calculée avec des données horaires (FACN1H (1 heure)), on se rend compte que les valeurs sont du même ordre de grandeur.

Dans le tableau 3.3, on peut voir la valeur de la FACN72 et de la FACN1H après un délai de 1 heure, 2 heures et 3 heures pour tous les cas analysés. Nous avons également indiqué la différence entre FACN72 et FACN1H pour les mêmes délais, une différence négative indique une surestimation de la FAC en utilisant les valeurs horaires (i.e. $FACN1H > FACN72$).

Pour Sept-Iles, (mars-avril), nous avons FACN1H toujours inférieur à FACN72 pour les délais de 1 heure, 2 heures et 3 heures, alors que Sept-Iles janvier et Ste-Agathe juin-juillet, la FAC est surestimée par les valeurs horaires. Dans tous les autres cas, la FACN1H est soit supérieure à FACN72 après une heure de délai et inférieure après 2 ou 3 heures ou vice versa.

Dans tous les cas, sauf Ste-Agathe juin-juillet où les vents sont très faibles, la différence de la FAC évaluée par les deux méthodes est très petite, ce qui nous permet donc de conclure que les données horaires peuvent être utilisées pour calculer la FAC en étant représentative de la réalité. Par contre, on ne peut utiliser la FAC de délai 1 heure entre 0 et 1 heure puisque dans la première minute et demie la FAC décroît très rapidement et la relation n'est plus linéaire. Il faudra donc utiliser les valeurs horaires de la FAC après des délais de 1 heure, 2 heures et 3 heures, tracer la droite rejoignant ces trois points et extrapoler entre 0 et 1 heure. Les valeurs extrapolées pourront à ce moment être utilisées pour les calculs de la FAC avant 1 heure.

Puisque la FAC de délai 1 heure, 2 heures et 3 heures est très rapprochée que l'on utilise les données horaires ou les données au 72 secondes (voir tableau 3.3), on peut donc calculer l'erreur due à l'échantillonnage en se servant des données horaires pour obtenir la fonction d'auto-corrélation temporelle et en utilisant l'équation 3.5 pour procéder aux calculs.

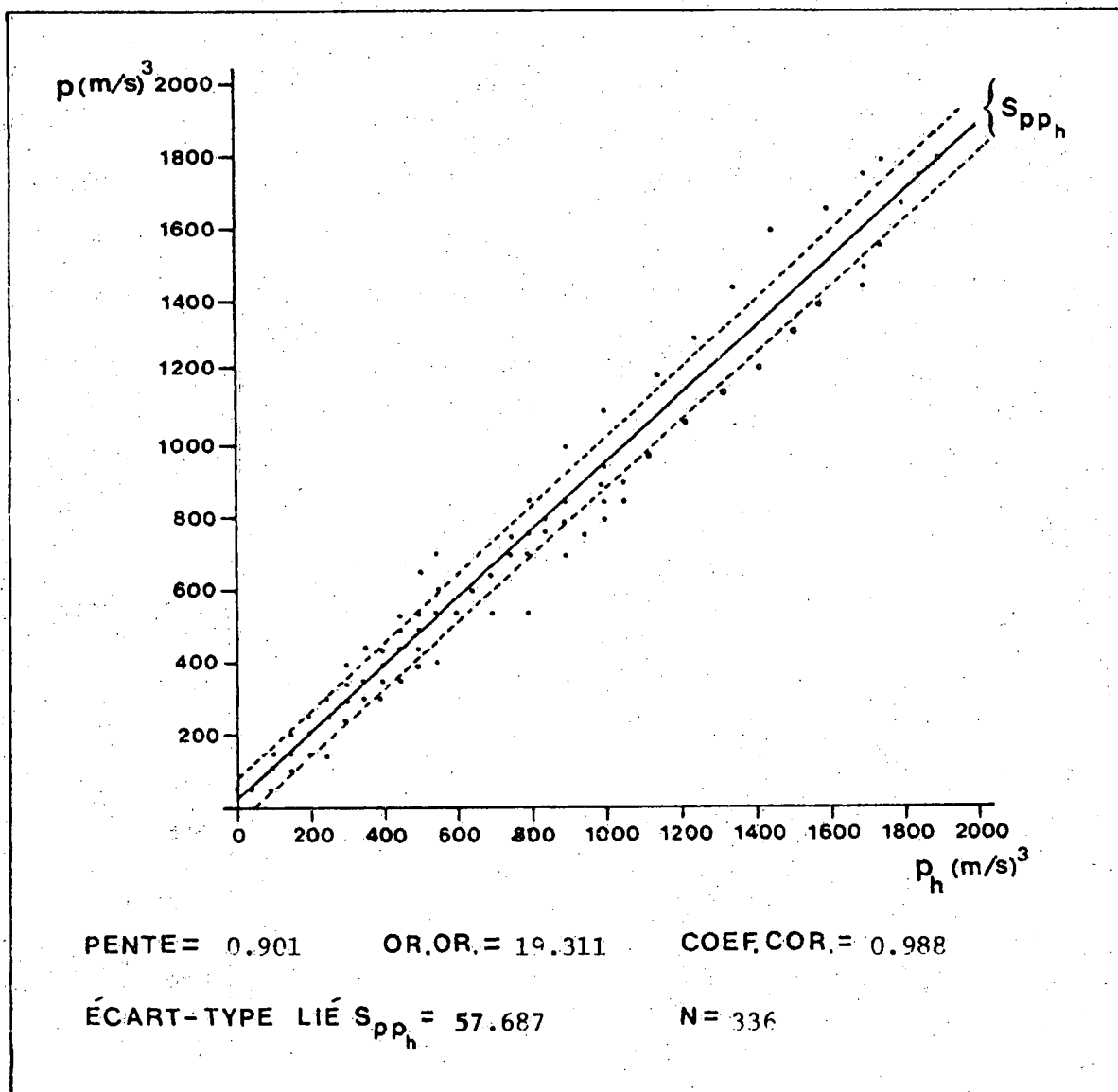


Figure 3.1 : Diagramme de dispersion illustrant la relation entre la puissance éolienne moyenne journalière évaluée avec les données horaires (p_h) et avec les données continues aux 72 secondes (p) pour la station Dorval du 1^{er} janvier au 15 janvier 1976.

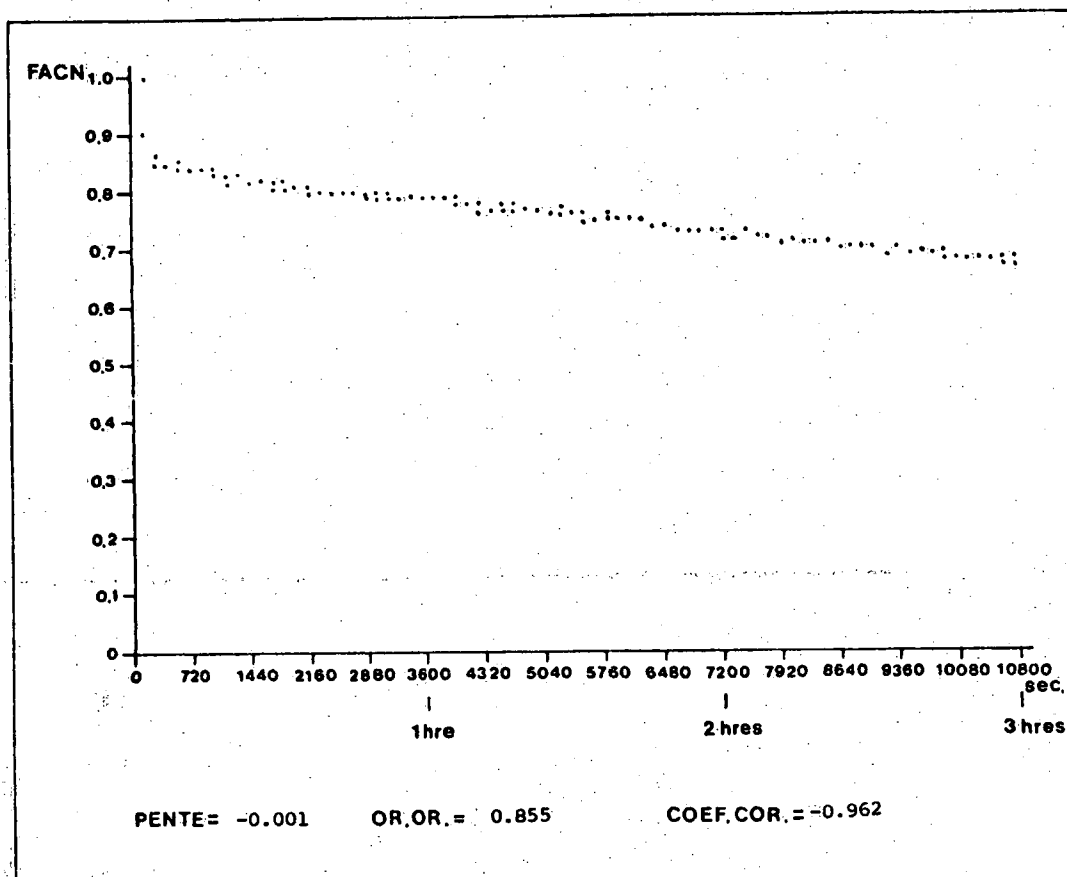


Figure 3.2 : Fonction d'autocorrélation normalisée de (p) à partir de données
 prises à toutes les 72 secondes (FACN72) pour la station Dorval
 du 1^{er} au 15 janvier 1976.

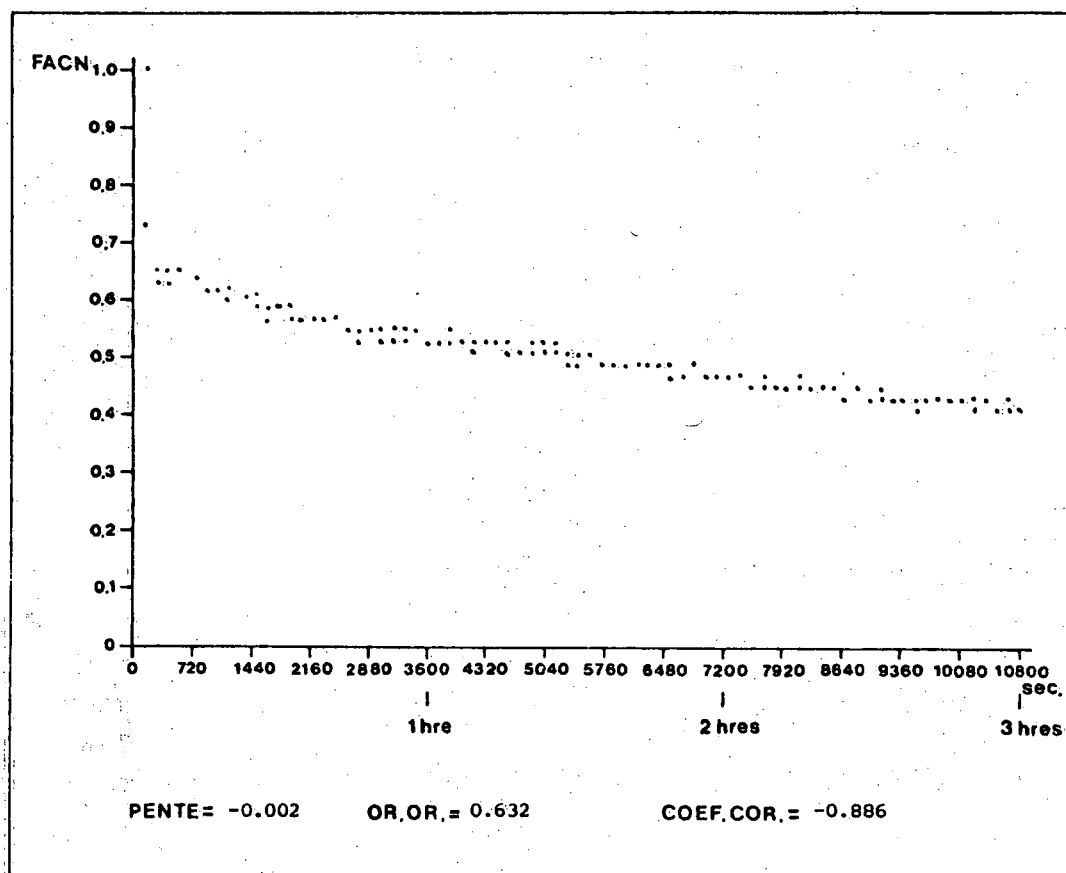


Figure 3.3 : Idem figure 3.2 pour la station Dorval du 1^{er} au 15 octobre 1978.

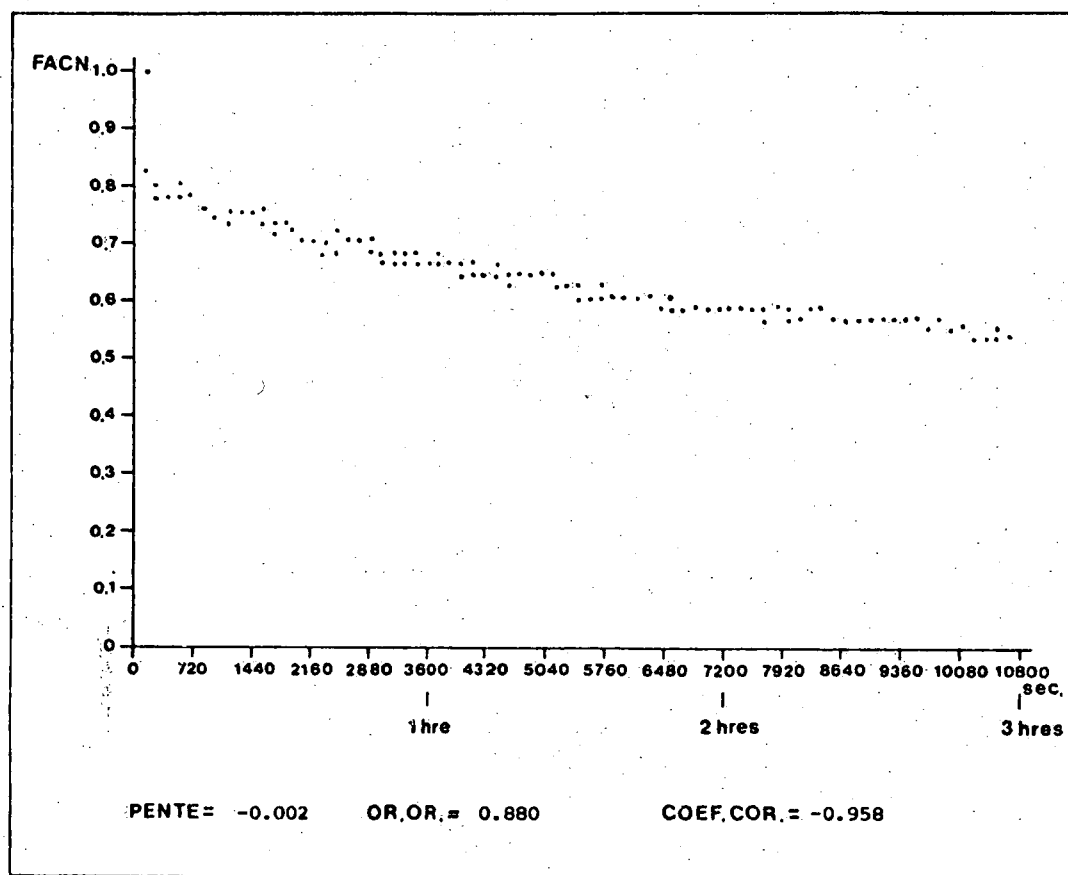


Figure 3.4 : Idem figure 3.2 pour la station Sept-Iles du 1^{er} au 15 janvier 1976.

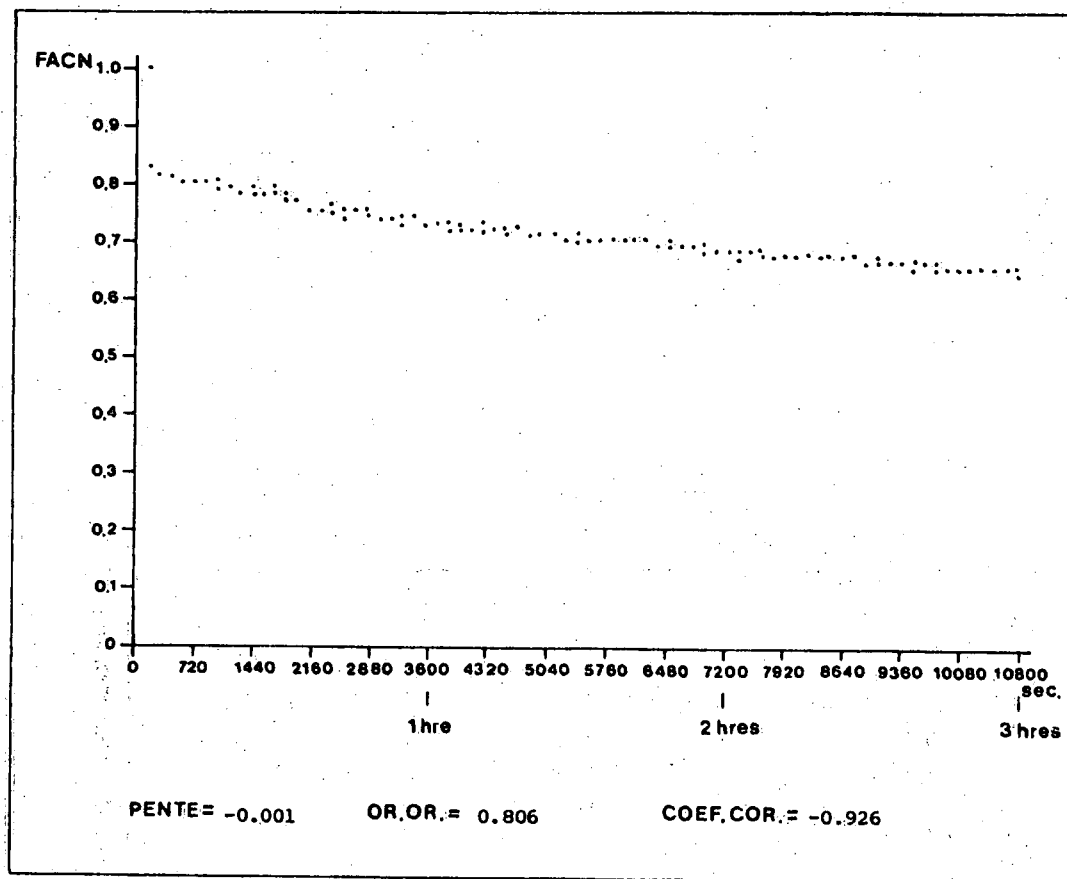


Figure 3.5 : Idem figure 3.2 pour la station Sept-Iles du 24 mars au 7 avril 1976.

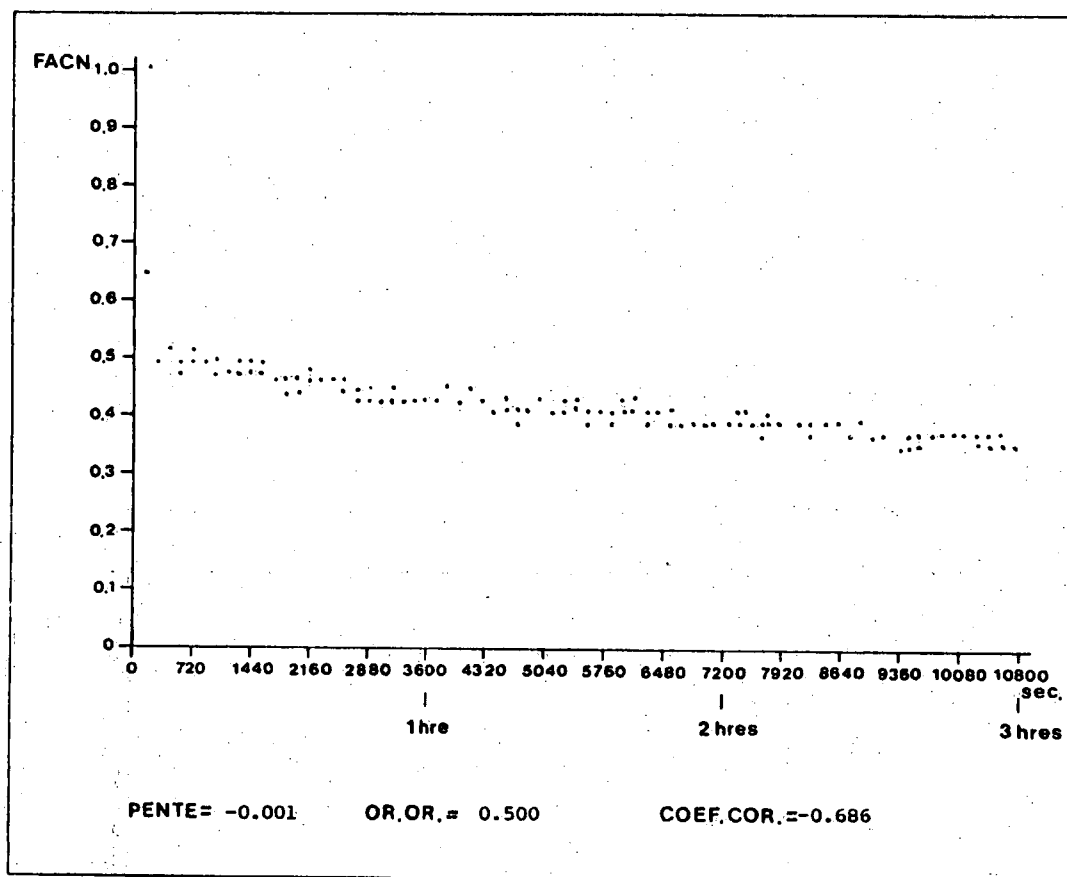


Figure 3.6 : Idem figure 3.2 pour la station Ste-Agathe du 1^{er} au 15 janvier 1978.

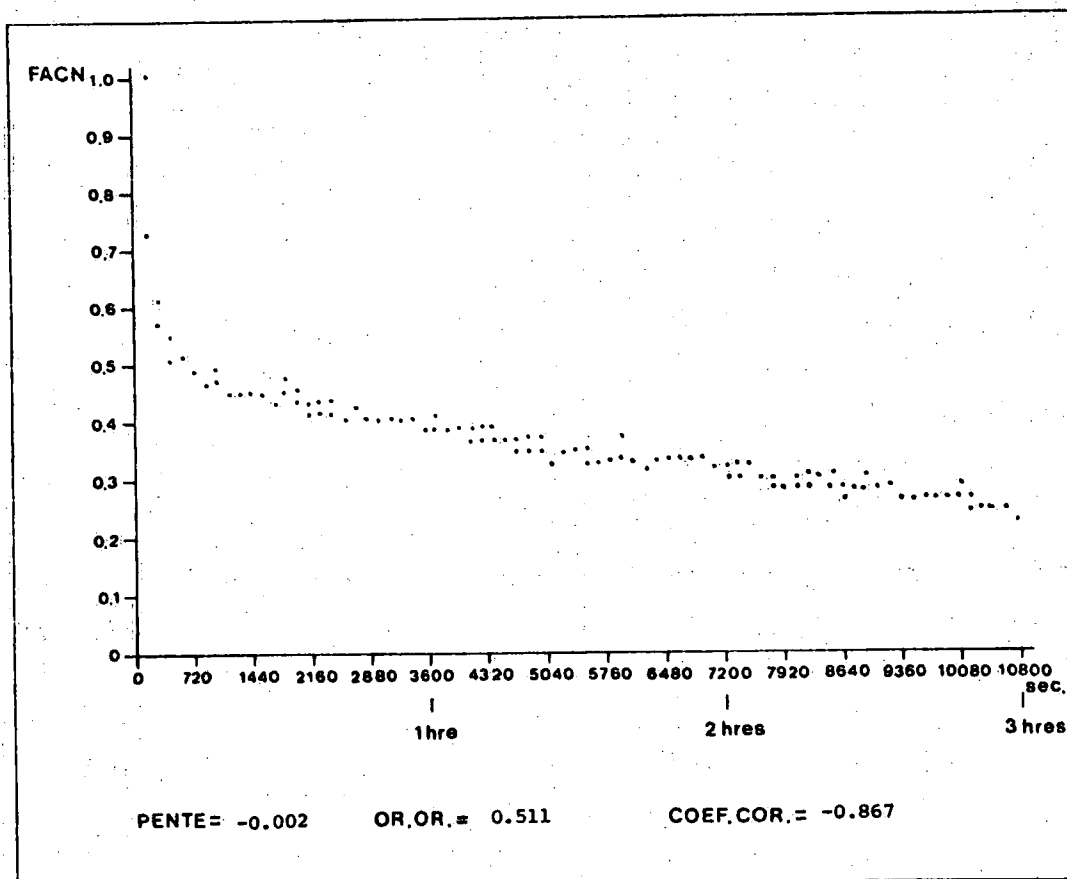


Figure 3.7 : Idem figure 3.2 pour la station Ste-Agathe du 25 juin au 9 juillet 1976.

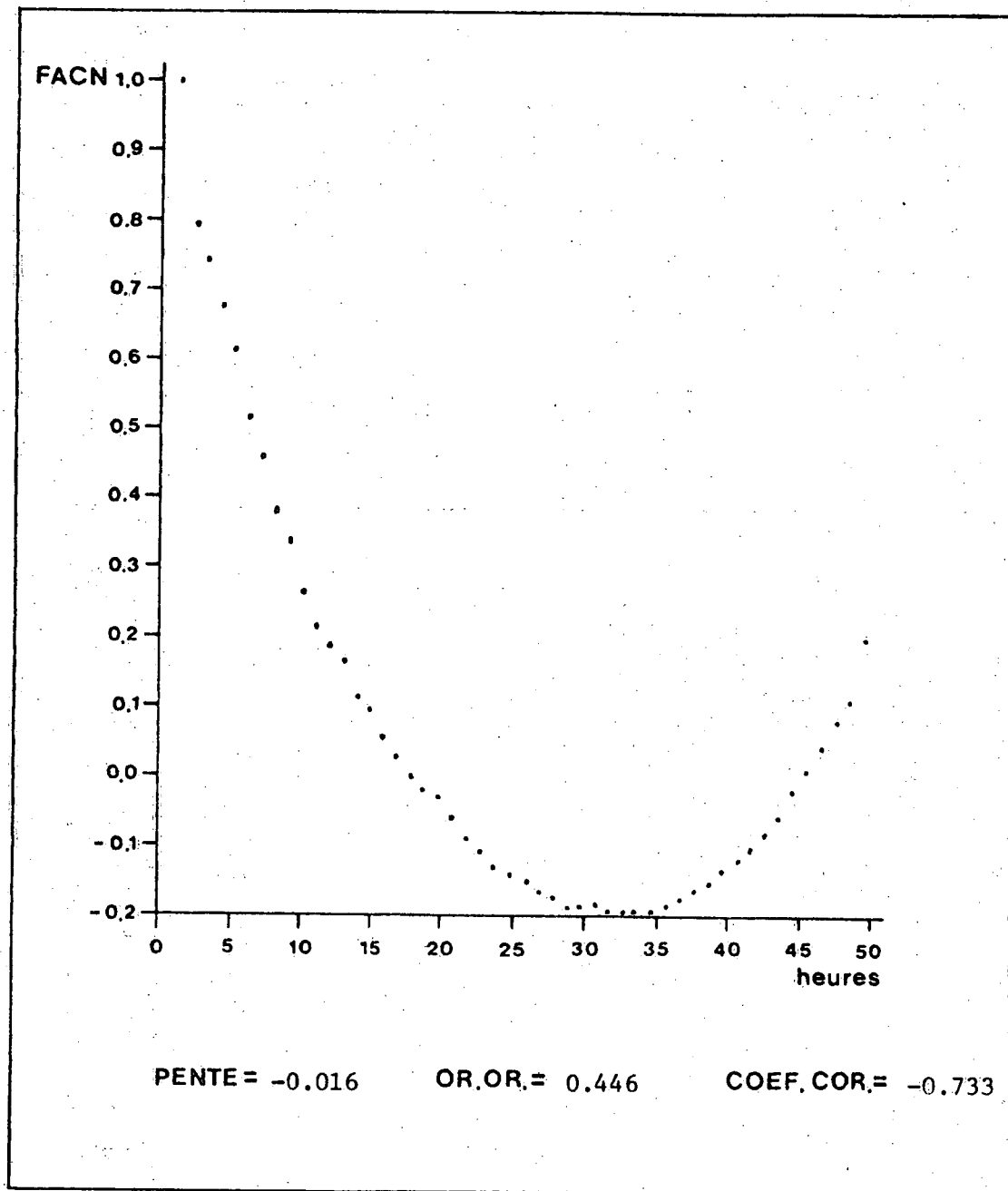


Figure 3.8 : Fonction d'autocorrélation normalisée de (p_h) obtenue à partir des données horaires du vent (FACN1H) pour des délais de 1 heure à 48 heures pour Dorval du 1^{er} au 15 janvier 1976.

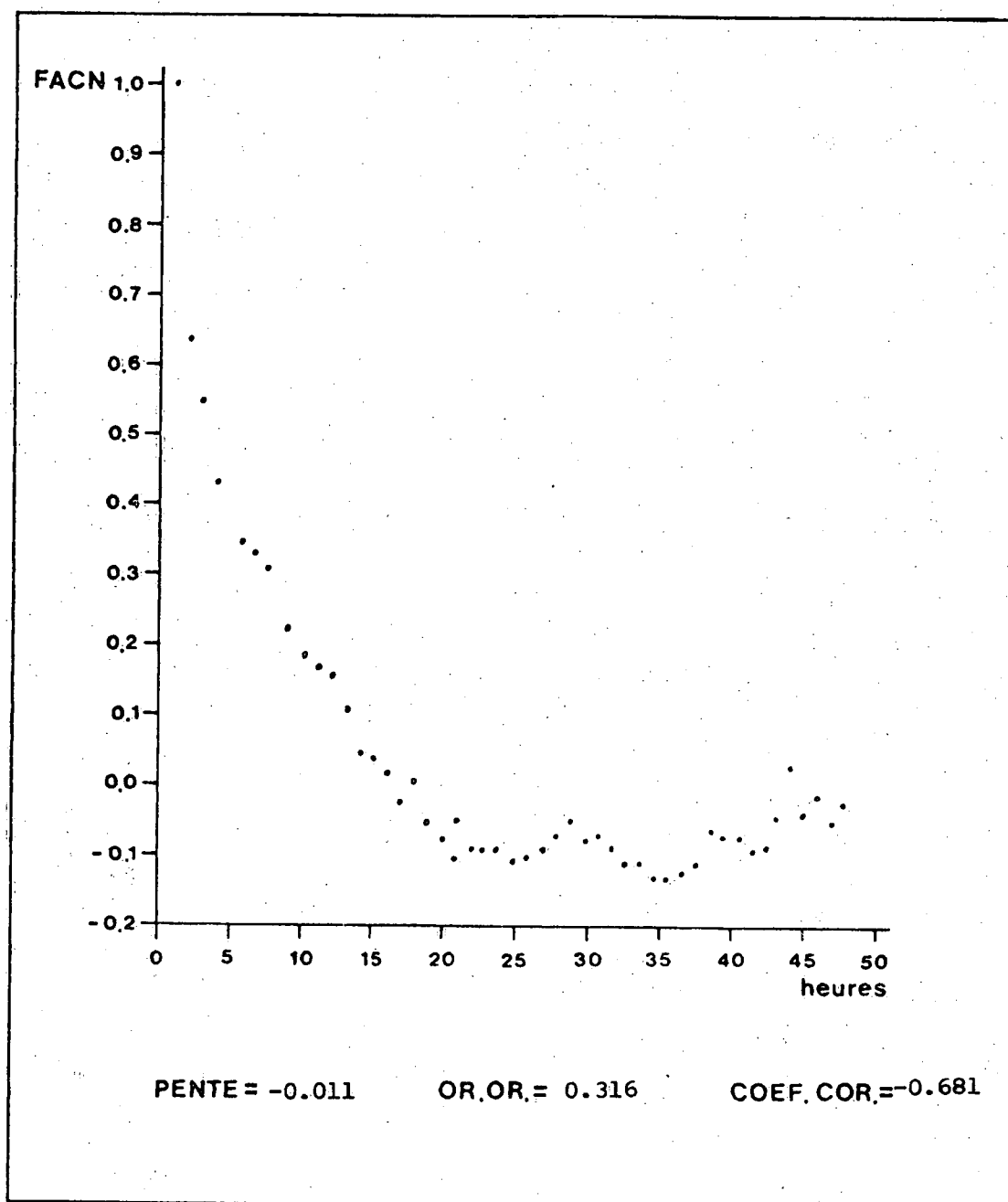


Figure 3.9 : Idem figure 3.8 pour la station Dorval du 1^{er} au 15 octobre 1978.

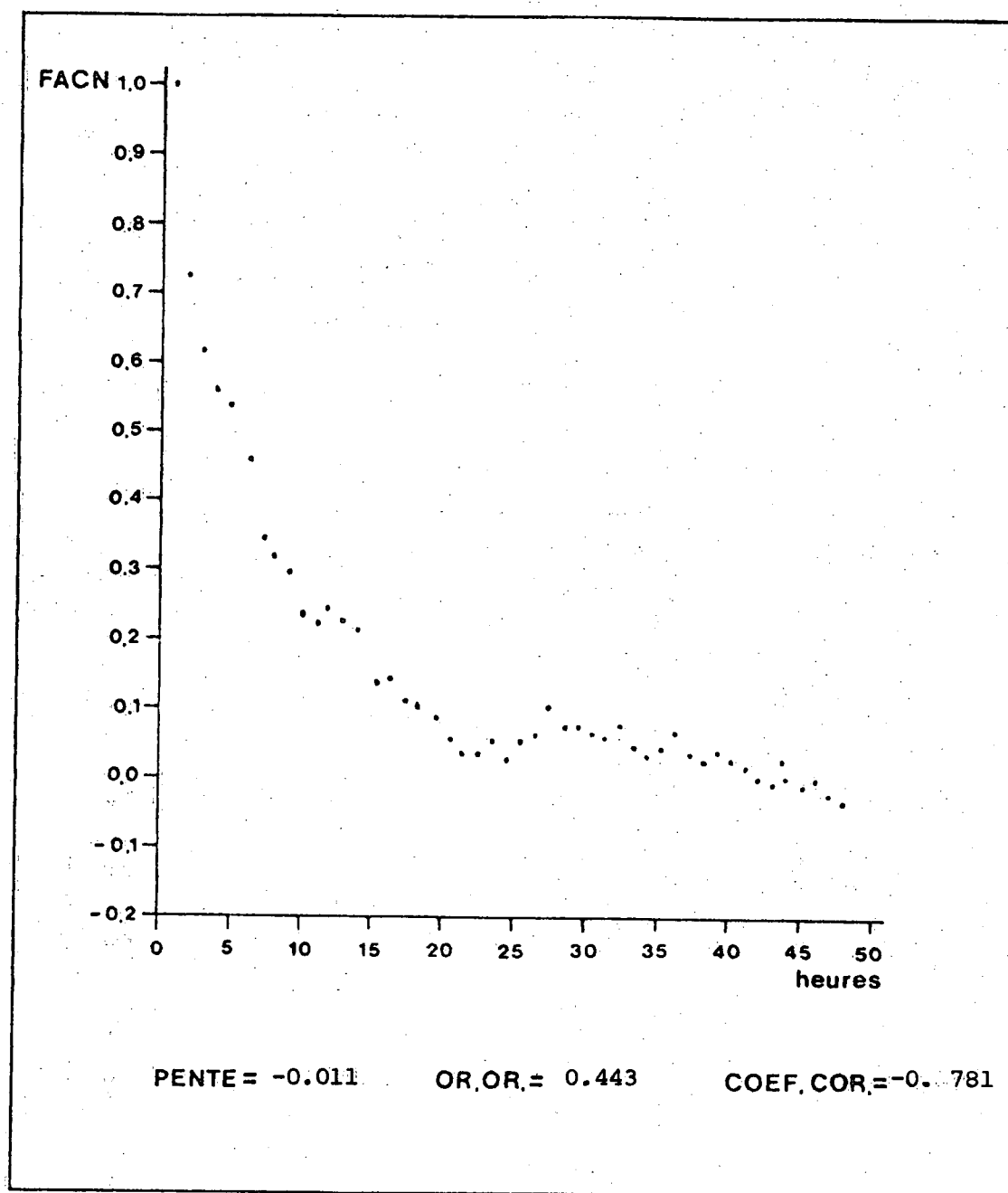


Figure 3.10 : Idem figure 3.8 pour la station Sept-Iles du 1^{er} au 15 janvier 1976.

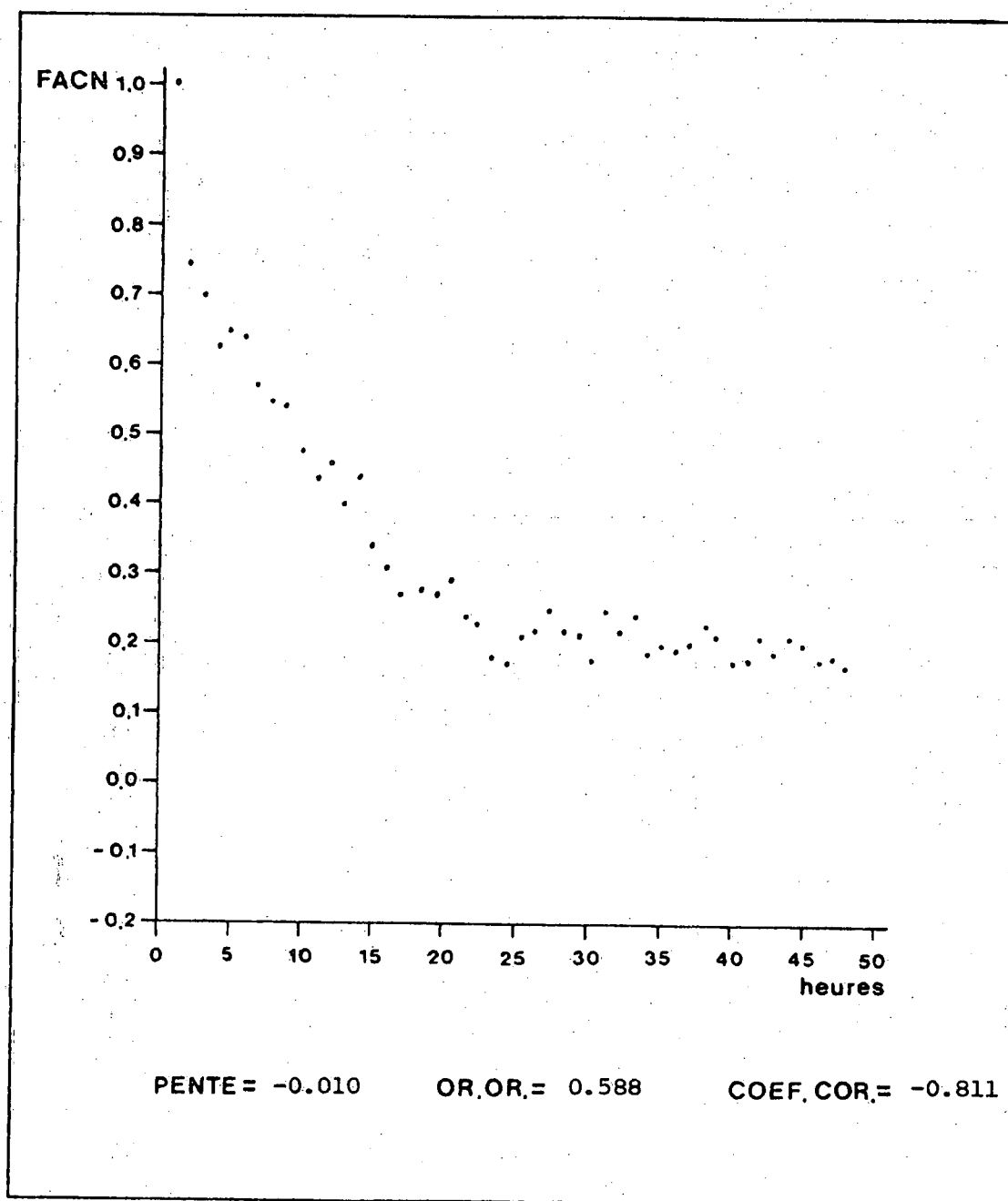


Figure 3.11 : Idem figure 3.8 pour la station Sept-Iles
du 24 mars au 7 avril 1976.

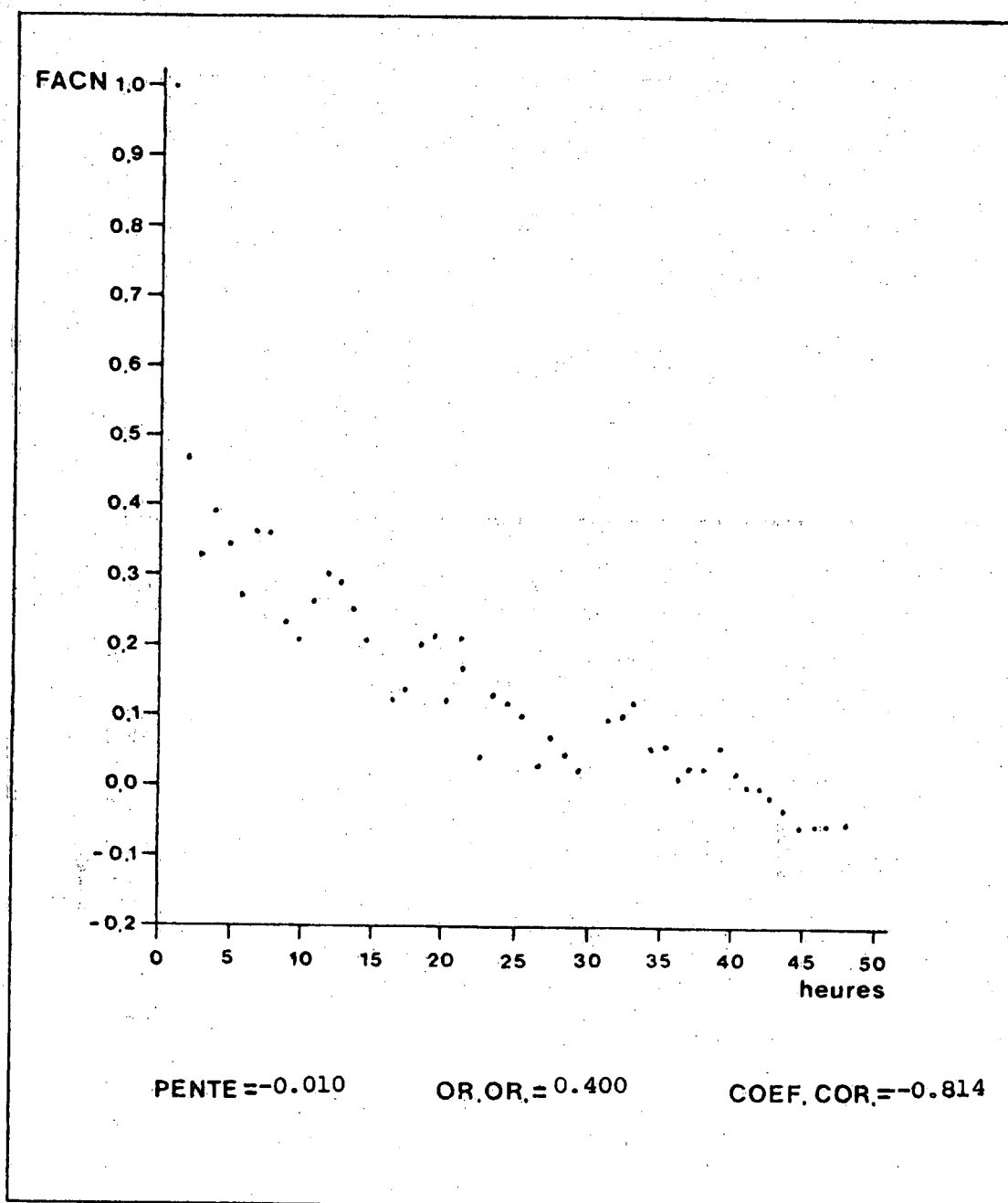


Figure 3.12 : Idem figure 3.8 pour la station Ste-Agathe du 1^{er} au 15 janvier 1978.

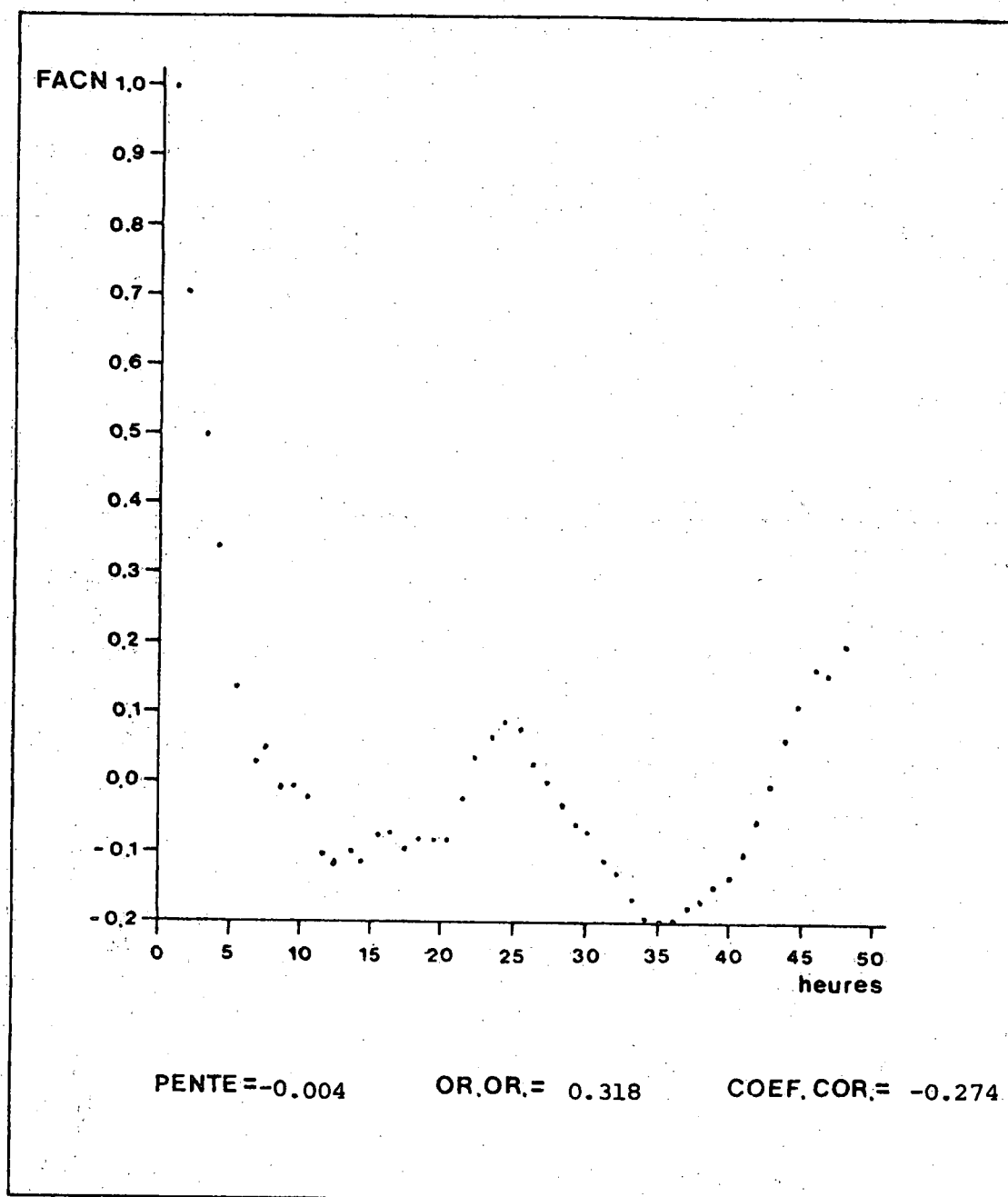


Figure 3.13 : Idem figure 3.8 pour la station Ste-Agathe
du 25 juin au 9 juillet 1976.

Station	Date	Pente	coefficient de corrélation	ordonnée à l'origine
Dorval	janvier	.90	.99	19.3
Dorval	octobre	.98	.99	1.85
Sept-Iles	janvier	1.13	.99	-11.6
Sept-Iles	mars-avril	.97	.99	17.1
Ste-Agathe	janvier	.88	.95	25.2
Ste-Agathe	juin-juillet	.99	.97	4.9

Tableau 3.1 : Pente de la droite de meilleure régression, coordonnée à l'origine, coef. de corrélation. Graphique de la puissance éolienne (moyenne journalière) évaluée à partir des données de vent aux 72 secondes (p) versus évaluée à partir des données horaires du vent (p_h).

Station	date (15 jours)	$p \text{ (m/s)}^3$		$P_h \text{ (m/s)}^3$	
		max.	min.	max.	min.
Dorval	janvier	1792.28	29.88	1906.8	24.7
Dorval	octobre	488.47	8.79	494.26	10.29
Sept-Iles	janvier	1013.46	12.13	872.29	10.59
Sept-Iles	mars-avril	1545.26	2.72	1650.10	.26
Ste-Agathe	janvier	854.77	2.12	1058.74	1.98
Ste-Agathe	juin-juillet	130.86	7.27	122.89	6.19

Tableau 3.2 : Puissance éolienne maximale et minimale (moyenne journalière) en utilisant les données aux 72 secondes (p) et en utilisant les données horaires (p_h) du vent.

Station	Date	FACN72	FACN1H	Δ FAC
<u>Délai 1 heure</u>				
Dorval	janvier	.798	.793	.005
Dorval	octobre	.543	.630	-.087
Sept-Iles	janvier	.677	.724	-.047
Sept-Iles	mars-avril	.749	.744	.005
Ste-Agathe	janvier	.439	.462	-.023
Ste-Agathe	juin-juil.	.406	.695	-.289
<u>Délai 2 heures</u>				
Dorval	janvier	.733	.741	-.008
Dorval	octobre	.476	.538	-.062
Sept-Iles	janvier	.603	.607	-.004
Sept-Iles	mars-avril	.699	.692	.007
Ste-Agathe	janvier	.400	.324	.076
Ste-Agathe	juin-juil.	.312	.493	-.181
<u>Délai 3 heures</u>				
Dorval	janvier	.684	.668	.016
Dorval	octobre	.422	.421	.001
Sept-Iles	janvier	.517	.554	-.037
Sept-Iles	mars-avril	.665	.620	.045
Ste-Agathe	janvier	.372	.379	-.007
Ste-Agathe	juin-juil.	.218	.342	-.124

Tableau 3.3 : FACN pour un délai de 1 heure, 2 heures et 3 heures, à partir des données aux 72 secondes (FACN72) et à partir des données horaires (FACN1H) pour les différentes stations.

CHAPITRE 4. COMPARAISON ENTRE LES DONNÉES ÉCHANTILLONNÉES ET DIGITALISÉES

Présentement, les données des stations climatologiques correspondent aux valeurs horaires de la vitesse du vent extraites à partir des valeurs lissées sur une minute avant l'heure.

Les mesures horaires de la vitesse du vent qui sont échantillonnées aux stations de mesure et qui sont publiées dans le sommaire météorologique mensuel ont été comparées avec les données de la vitesse horaire du vent digitalisées 72 secondes avant l'heure par l'ordinateur. La figure 4.1 illustre une telle comparaison entre la vitesse horaire échantillonnée (v_e) et la vitesse horaire du vent digitalisée (v_d) pour la station Ste-Agathe du 1^{er} au 15 janvier 1978.

On constate que la pente de la droite de meilleure régression est égale à 1.006, ce qui entraîne une erreur systématique quasi négligeable de l'ordre de 0.6%. Par contre, l'écart-type lié ($Sv_d v_e$) étant égal à 4.960km/h ceci permet de calculer selon la méthode décrite au chapitre 2, une erreur aléatoire (ϵ) égale à 0.442, soit environ 44%. Le tableau 4.1 décrit en détail les statistiques reliées à la relation entre la vitesse horaire du vent échantillonnée (v_e) et la vitesse horaire du vent digitalisée (v_d). L'erreur systématique montrée par les différentes valeurs des pentes est peu importante puisque ces valeurs oscillent entre 0.880 et 1.014 (voir tableau 4.1). Par contre, les erreurs aléatoires montrent une augmentation significative par rapport à l'erreur systématique puisque les valeurs du paramètre (ϵ) varient de 0.218 à 0.442 ce qui traduit des erreurs aléatoires variant entre 21.8% et 44.2%.

On peut expliquer l'importance de cette erreur aléatoire par l'hypothèse suivante : les données digitalisées de la vitesse du vent par l'ordinateur représentent la valeur calculée de la vitesse du vent 72 secondes avant l'heure. La valeur pointée par le technicien de la station climatologique représente la valeur de la vitesse du vent lissée sur une période d'une minute avant l'heure. En comparant une valeur lissée à une valeur calculée de la vitesse du vent on peut ainsi introduire une erreur aléatoire non négligeable.

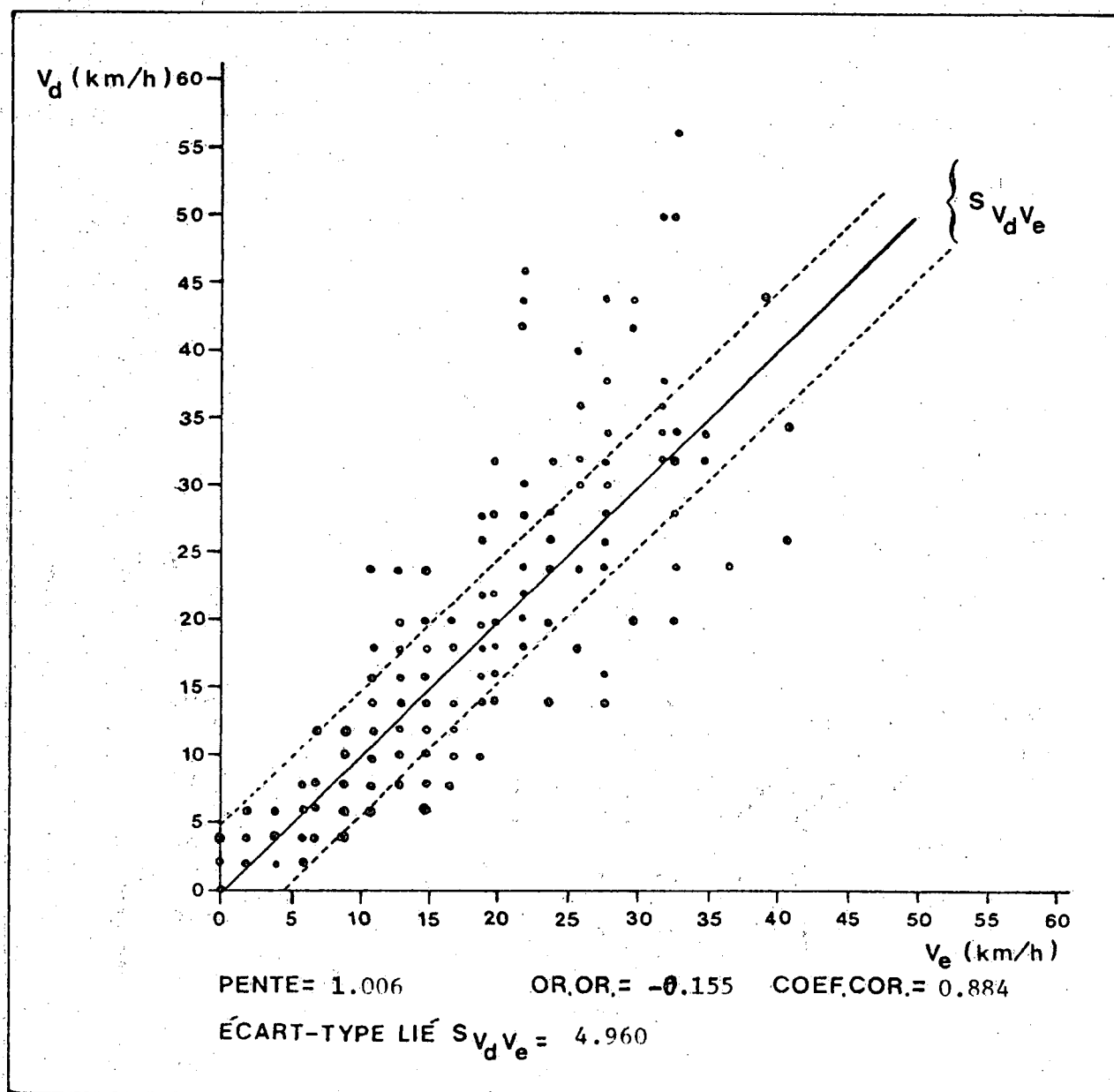


Figure 4.1: diagramme de dispersion illustrant la relation entre la vitesse du vent horaire échantillonnée (v_e) et la vitesse du vent horaire digitalisée (v_d) 72 secondes avant l'heure pour la station Ste-Agathe du 1e au 15 janvier 1978.

fichier	pente	OR.OR	COEF. COR	$S(v_d v_e)$	(ϵ)	N
DJAN15	0.929	1.512	0.960	1.905mi/h.	0.218	360
DOCT15	0.914	1.068	0.884	3.635km/h.	0.364	360
SJAN15	1.006	- 0.155	0.884	4.960km/h.	0.442	360
SJUN15	0.880	1.406	0.881	2.999km/h.	0.400	360
IJAN15	0.958	0.421	0.924	2.183mi/h.	0.292	360
IMAA15	1.014	0.353	0.880	3.707mi/h.	0.494	360

Tableau 4.1 : Statistiques résultant de la relation entre la vitesse du vent horaire échantillonnée (v_e) et la vitesse du vent horaire (v_d) digitalisée 72 secondes avant l'heure pour 5 stations d'échantillonnage.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

L'erreur de lissage sur l'évaluation de la puissance éolienne à partir de $(\bar{V})^3_n$ pour $n = 12$ minutes a été mis en évidence à la station Ste-Agathe du 1^{er} au 15 janvier 1976 et du 25 juin au 9 juillet 1976. Cet effet de lissage a aussi été légèrement senti pour la station de Dorval de 1^{er} au 15 octobre 1978. Par contre aucun effet de lissage n'a été enregistré pour la station de Dorval du 1^{er} au 15 janvier 1976 et pour la station Sept-Iles du 1^{er} au 15 janvier 1976 et du 24 mars au 7 avril 1976.

De plus, l'erreur systématique qui résulte d'un lissage pour $n = 60$ minutes est comparable à l'erreur résultant d'un lissage de 12 minutes. On peut donc conclure que la variabilité de la vitesse du vent en général se retrouve à l'intérieur d'une échelle de 12 minutes de façon à ce qu'elle soit indifférente si les données de la vitesse du vent sont lissées sur une heure plutôt que sur une période de 12 minutes.

Les distributions de probabilités des différentes classes de puissances éoliennes montrent que le potentiel éolien de la station Ste-Agathe est très inférieure à celui des stations Dorval et Sept-Iles. Quant à l'erreur systématique engendrée sur le potentiel éolien, cette erreur n'est significative que pour la station Ste-Agathe en hiver et en été de même que pour la station de Dorval durant l'automne. Quant au potentiel éolien calculé à partir de données non lissées de la vitesse du vent, on note aucune erreur systématique importante par rapport à l'évaluation du potentiel éolien faite à partir de valeurs lissées de la vitesse du vent.

L'échantillonnage des données en calculant la puissance éolienne moyenne journalière à partir des données horaires peut produire une variation de l'ordre de 10% en plus ou en moins par rapport à la valeur réelle de la puissance éolienne. Puisque la fonction d'autocorrélation (FAC) de délai 1 heure, 2 heures et 3 heures est très rapprochée que l'on utilise les données horaires ou les données aux 72 secondes (voir tableau 3.3), on peut donc calculer l'erreur due à l'échantillonnage en se servant des données horaires pour obtenir la fonction d'autocorrélation temporelle et en utilisant l'équation 3.5 pour procéder aux calculs.

Suivant la comparaison entre les données horaires de la vitesse du vent obtenues à partir des stations climatologiques et celles digitalisées par l'ordinateur, on a remarqué aucune erreur systématique significative entre les 2 modes de mesure. Par contre, l'échantillonnage des données à partir de valeurs lissées sur une minute fait intervenir des erreurs aléatoires non négligeables.

REFERENCES

LIST, R.J. 1963 : Smithsonian Meteorological Tables.

PANOFSKY, H.A. and G.W. BRIER, 1965 : Some Applications of Statistics to Meteorology. The Pennsylvania State University, Chap. 4.

ZAWADZKI, I.I., 1973 : Errors and fluctuations of raingauge estimates of areal rainfall. J.Hydrol., 18:243-255.

ZAWADZKI, I.I., 1976 : Précision d'un réseau de pluviomètres. 11^e Congrès Annuel de la Société Météorologique du Canada, Québec, Qué.

APPENDICE

Évaluation de l'erreur systématique due à un échantillonnage des données

Dans l'étude actuelle nous disposons de la valeur de la de la vitesse du vent à toutes les 72 secondes pour 5 stations météorologiques. Puisque les données normalement disponibles pour ces stations sont des données horaires plutôt que suivant des intervalles de 72 secondes, il est important d'évaluer la perte d'information découlant d'un tel échantillonnage.

La théorie reliant la perte d'information due à un échantillonnage est décrite en détail dans les travaux de Zawadzki (1973) dans le cas d'un réseau de pluviomètres. La théorie se réfère toutefois à des coordonnées spatiales plutôt que temporelles et nous ferons ressortir dans cette introduction la transformation de coordonnées de la théorie déjà connue.

Supposons que $V(t)$ est la vitesse du vent en fonction du temps et V_h est la valeur instantanée de $V(t)$ à l'heure h , la moyenne de la puissance éolienne $p = \int 2V^3$ durant une période de temps $H = nh$ est

$$P = \frac{\rho}{2H} \int_{-H/2}^{H/2} V^3(t) dt$$

(1)

la valeur estimée à partir des échantillons V_h est :

$$P_h = \frac{1}{n} \sum_{h=1}^n V_h^3 \quad (2)$$

Nous supposons une relation linéaire entre P et P_h , i.e. que sur un diagramme de dispersion de P en fonction de P_h , la courbe de meilleure régression est une droite. Ceci n'est pas nécessairement le cas et le traitement est donc une première approximation. Toutefois dans tous les cas analysés pour le vent, la relation linéaire est très bien marquée. Si M est la pente de la droite de meilleure régression les valeurs de P obtenues à partir d'un tel graphique et appelées P' peuvent être exprimées par

$$P' - \bar{P} = M (P_h - \bar{P}_h) \quad (3)$$

ou $(\bar{\quad})$ indique la moyenne temporelle prise sur toutes les données. Donc, $\bar{P}$ et $\bar{P}_h$ sont les valeurs moyennes dans le temps de P et P_h . Il est clair que $\bar{P} = \bar{P}_h$.

Si dans (3), $M = 1$, il n'y a aucune erreur systématique dans l'estimé du vent à partir des données horaires. Une valeur de $M > 1$ indique une sous estimation. Une valeur de $M < 1$ indique une surestimation.

La pente M et le coefficient de corrélation linéaire entre P et P_h sont donnés par (voir exemple Panofsky et Brier, 1965)

$$M = \frac{\overline{P P_h} - (\bar{P})^2}{(\overline{P_h})^2 - (\bar{P})^2} \quad (4)$$

$$r = \frac{\overline{P P_h} - (\bar{P})^2}{\left(\left[(\overline{P_h^2}) - (\bar{P_h})^2 \right] \left[(\overline{P^2}) - (\bar{P})^2 \right] \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

Dans Zawadzki (1973), l'erreur quadratique moyenne de l'estimé de P par P_h est donnée par

$$\overline{e^2} = \overline{(P - P_h)^2} = (\overline{P^2}) + (\overline{P_h^2}) - 2 \overline{P P_h} \quad (6)$$

la variance de P et la déviation quadratique moyenne de P_h sont données par

$$\sigma^2 = \overline{(P - \bar{P})^2} = (\overline{P^2}) - (\bar{P})^2 \quad (7)$$

et

$$\epsilon^2 = \overline{(P_h - \bar{P})^2} = (\overline{P_h^2}) - (\bar{P})^2 \quad (8)$$

L'équation (7) représente la fluctuation temporelle du vent alors que (8) est son estimé par les données météorologiques horaires.

On peut également évaluer l'erreur due à l'échantillonnage à partir de la fonction d'auto-corrélation temporelle (FAC), en se servant

de la théorie décrite en détail par Zawadzki (1973).

La théorie est décrite pour des coordonnées spatiales (x,y), il s'agit donc de faire une transformation en coordonnées temporelles de l'équation (20) dans Zawadzki (1973) et on obtient

$$\frac{e}{\sigma^2} = \frac{1}{n} \sum_{p=1-n}^{n-1} (n - |p|) a_p +$$

$$\frac{1}{H^2} \int_{-H}^H (H - |t|) a(t) dt -$$

$$\frac{2}{nH} \sum_{p=1-n}^{n-1} (n - |p|) \int_{(|p| - \frac{1}{2})}^{(|p| + \frac{1}{2})} a(t) dt$$

où

e = erreur quadratique moyenne

n = nombre de données

H = nh

$a(t)$ = fonction d'auto-corrélation temporelle

σ^2 = variance de P

a_p = FAC évaluée au point p ($p=1h., 2h., 3h.$
... nh)

De cette façon, la connaissance de σ^2 et la FAC de P permettent de déterminer les erreurs aléatoires et de la même façon les erreurs systématiques dues à l'échantillonnage des données.