

études et recherches

Cartographie du vent en Guadeloupe et en Martinique

Didier Delaunay



cartographie du vent en Guadeloupe et en Martinique

par Didier DELAUNAY
ingénieur au CSTB

RÉSUMÉ

Une cartographie précise du vent en Martinique et en Guadeloupe est présentée. Les caractéristiques moyennes du vent sont données à une hauteur de 60 m, avec une résolution de 1,8 km. Une méthode de calcul pour estimer ces caractéristiques à une hauteur inférieure, sur un site choisi, est proposée.

SUMMARY

An accurate spatial description of wind is proposed for Martinique and Guadeloupe. The average characteristics of wind are given at 60 m height for areas of 1.8x1.8 km. A method to estimate wind characteristics at a lower height on a site is proposed.

RESUMEN

Presentación de una cartografía precisa del viento en Martinica y Guadalupe. Se precisan las características de promedio del viento a una altura de 60 m, con una resolución de 1,8 km. Se propone un método de cálculo para evaluar estas características a una altura inferior y en un emplazamiento determinado.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle de cet ouvrage faite sans le consentement du CSTB est illicite. Elle constitue une contrefaçon au sens de la loi du 11 mars 1957.

© CSTB 1989

sommaire

1 Introduction.....	2
2 Les caractéristiques du terrain.....	3
2,1 Paramétrisation de l'influence du sol.....	3
2,2 La méso-rugosité	3
2,3 Le coefficient de relief.....	4
3 Le vent aux stations météorologiques	8
3,1 Les données de base	8
3,2 Le vent de méso-échelle	8
3,3 Variations diurnes	9
4 Cartographies du vent	12
4,1 Méthode d'interpolation	12
4,2 Cartographies.....	12
5 Le vent au site de construction.....	17
5,1 Site homogène	17
5,2 Sites non homogènes	18
5,3 Sites complexes	18
6 Conclusion.....	24
Bibliographie.....	24
Annexe : Calcul des coefficients C_h , C_T , C_S	25

En couverture :
Capesterre à Marie-Galante en Guadeloupe

La connaissance détaillée des caractéristiques du vent est essentielle dans des domaines aussi divers que l'optimisation de la ventilation naturelle des constructions, le confort dans les espaces extérieurs ou bien l'utilisation de l'énergie éolienne. On peut, à ce sujet, se référer à un certain nombre d'études réalisées au CSTB (réf. 1, 2, 3). Pour cela il faut, à la fois, une représentation spatiale précise du vent à l'échelle de la région et une méthode de transfert pour déterminer les caractéristiques du vent sur le site concerné.

C'est pourquoi, à la demande de l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, la division Climatologie du CSTB a développé ces dernières années une méthodologie qui permet d'établir des cartes des caractéristiques du vent avec une résolution de quelques kilomètres (réf. 4, 5, 6). Cette méthode s'est inspirée des études réalisées par J. Wieringa (réf. 7) pour la Hollande.

Le vent en altitude présente peu de variations horizontales à l'échelle de quelques dizaines de kilomètres. En revanche, au niveau de la surface du sol, la variation spatiale du vent est très importante. En effet, la vitesse du vent est influencée à la fois par la rugosité du sol : le frottement de l'air sur le sol est plus ou moins important suivant les types de terrain (mer, campagne, bois, etc.) et aussi par le relief : le vent est accéléré sur les sommets et, au contraire, diminué dans les vallées. A cela, il faut également ajouter les éventuels effets thermiques : stabilité, brises, etc.

Une cartographie régionale du vent consiste donc, en premier lieu, à déterminer les caractéristiques du vent en altitude, appelé « vent de macro-échelle », puis les caractéristiques du terrain : rugosité, relief et enfin, à l'aide des lois qui régissent la couche limite atmosphérique, à en déduire les caractéristiques du vent à proximité de la surface.

A une hauteur de 60 m, on peut admettre que les caractéristiques de la surface influent de façon moyenne (sur quelques km^2) sur le vent. C'est ce qu'on appelle la « méso-échelle ». Une cartographie du vent peut donc être réalisée à cette hauteur. A une hauteur inférieure, les éléments constitutifs de la surface agissent individuellement et une description régionale est beaucoup plus complexe.

Nous présentons ici les cartographies donnant les caractéristiques moyennes du vent en Guadeloupe et en Martinique, à 60 m de hauteur, et par blocs de 1' de côté en longitude et latitude, soit environ 1,8 km.

De plus, pour des sites peu perturbés, on donne la méthode pour déterminer, à partir des données cartographiques, les caractéristiques du vent à une hauteur inférieure à 60 m. Dans les autres cas, ces données peuvent servir de référence pour la modélisation numérique ou la simulation en soufflerie atmosphérique.

2,1 paramétrisation de l'influence du sol

Les effets du terrain sur le vent de méso-échelle peuvent être caractérisés par les notions de « méso-rugosité » et de « coefficient de relief », ces 2 notions étant liées aux caractéristiques moyennes de chaque bloc.

La méso-rugosité z_{om} est définie comme la longueur de rugosité qu'aurait un terrain homogène induisant, en moyenne spatiale, le même flux de quantité de mouvement que le terrain réel. Avec cette définition, le module V du vent en altitude peut alors s'écrire :

$$V = \frac{U_*}{0,41} \left(B^2 + \left(\ln \left(\frac{U_*}{z_{om} f} \right) - A \right)^2 \right)^{1/2} \quad (1)$$

où :

U_* est la vitesse de frottement
 f le paramètre de Coriolis
 A et B des constantes empiriques fonctions de la stabilité thermique.

Les valeurs de A et B sont ajustées en fonction de l'heure de la journée et de la situation géométrique d'après les mesures de vent aux stations météorologiques (cf. § 3,3).

En appliquant la loi logarithmique au profil de vent, la vitesse de frottement U_* peut être calculée en fonction de la vitesse à 60 m de hauteur (vent de méso-échelle U_m) par :

$$U_* = 0,41 U_m / \ln(60/z_{om}) \quad (2)$$

Ces relations s'appliquent théoriquement en terrain plat. Aussi, lorsque le relief de méso-échelle perturbe l'écoulement, le vent de méso-échelle U_m doit être corrigé de l'effet du relief. On a alors :

$$U_* = 0,41 \hat{U}_m / \ln(60/z_{om}) \quad (3)$$

$$\text{avec : } U_m = C_R \hat{U}_m \quad (4)$$

C_R étant le coefficient de relief.

2,2 la méso-rugosité

La rugosité moyenne de chaque bloc provient, d'une part, des obstacles répartis sur le sol (haies, maisons, etc.) qui forment une rugosité de terrain z_{ot} , d'autre part des aspérités formées par les variations locales du relief, qui donnent une rugosité de relief z_{oR} . On peut montrer que la méso-rugosité z_{om} est la somme de ces 2 rugosités (réf. 8).

La rugosité de terrain z_{ot} d'un bloc est déterminée à partir de cartes au 1/25 000. On distingue 6 classes de terrain de rugosité donnée (tableau 1). Sur chaque bloc, la proportion de surface p_i , occupée par chaque classe, est estimée. La contrainte totale exercée, sur le vent, par la surface du bloc, peut alors s'écrire :

$$U^2 = \sum_i U_i^2 p_i$$

où U_i est la contrainte exercée par chacune des rugosités de la classe i . Celle-ci peut être calculée, pour un vent géostrophique donné, à partir de l'équation (1). U_* étant ainsi déterminé, on peut en déduire, par cette même équation, la valeur de z_{om} . La dépendance du résultat en fonction du vent géostrophique étant faible, une valeur constante de $V = 10$ m/s est utilisée pour ce calcul.

Tableau 1 Classes de rugosités de terrain

Catégorie	Nature du terrain	$Z_o(m)$
I	Grande étendue d'eau (océan, mer, lac)	0,005
II	Prairies à herbes rases sans arbre ni construction	0,02
III	Rase campagne avec des obstacles épars (maisons, arbres, haies). Cultures basses	0,07
IV	Campagne avec cultures élevées, bocage lâche, habitat dispersé	0,25
V	Bocage dense, vergers, petits bois banlieue pavillonnaire	0,40
VI	Zones urbaines, bois et forêts	1,00

La rugosité de relief est déterminée en fonction du type de relief de chaque bloc. Cinq classes de terrain ont été définies et les rugosités associées ont été estimées d'après les résultats de Fiedler et Panofsky (réf. 9) et de Noilhan et al. (réf. 10) (tableau 2).

Tableau 2 Classes de rugosités de relief

Catégorie	Nature du relief	Z ₀ (m)
I	Terrain plat	-
II	Terrain vallonné	0,25
III	Très vallonné	0,50
IV	Très accidenté, moyenne montagne	1,00
V	Montagneux	2,00

La cartographie de la méso-rugosité, somme des rugosités de terrain et de relief, est donnée à la figure 1. Ces valeurs correspondent à la rugosité moyenne de chaque bloc de 1,8 km de côté. Le vent en un point donné dépendant des caractéristiques du terrain sur une distance plus importante, la méso-rugosité prise en compte pour la cartographie du vent est estimée d'après les méso-rugosités des blocs situés jusqu'à 4 km en amont du point considéré.

2,3 le coefficient de relief

Le coefficient de relief C_R est défini comme le rapport entre la vitesse U_m du vent de méso-échelle réel, et la vitesse \hat{U}_m que le vent aurait si la région était plate (même altitude moyenne pour l'ensemble des blocs). On a donc :

$$U_m = C_R \hat{U}_m$$

Le coefficient de relief est calculé pour chaque bloc en utilisant une modélisation numérique basée sur l'équation de continuité. Lorsque les points de mesures sont suffisamment nombreux, il est en effet possible d'obtenir une interpolation du champ de vent en imposant la seule condition de conservation de la masse (réf. 11, 12, 13). C'est le code NOABL qui est utilisé ici (réf. 14). Ce modèle permet de prendre en compte la stabilité de l'atmosphère.

Le coefficient de relief dépend donc de la direction du vent, mais aussi de la stratification thermique de l'atmosphère. Les directions de vent ont été décomposées en 9 secteurs de 40°. Pour chaque bloc, sont donc calculés 9 coefficients de relief pour les situations nocturnes (atmosphère stable) et 9 coefficients de relief pour les situations diurnes (atmosphère instable).

Les données de topographie sont les altitudes moyennes des blocs (fig. 2). Un champ de vent uniforme est imposé en mer. Le modèle calcule, pour les 18 situations, le champ de vent qui satisfait au mieux l'équation de continuité, d'où le coefficient de relief en chaque bloc. La figure 3 montre un exemple de carte de coefficient de relief, pour une situation diurne, et des vents de direction ENE.

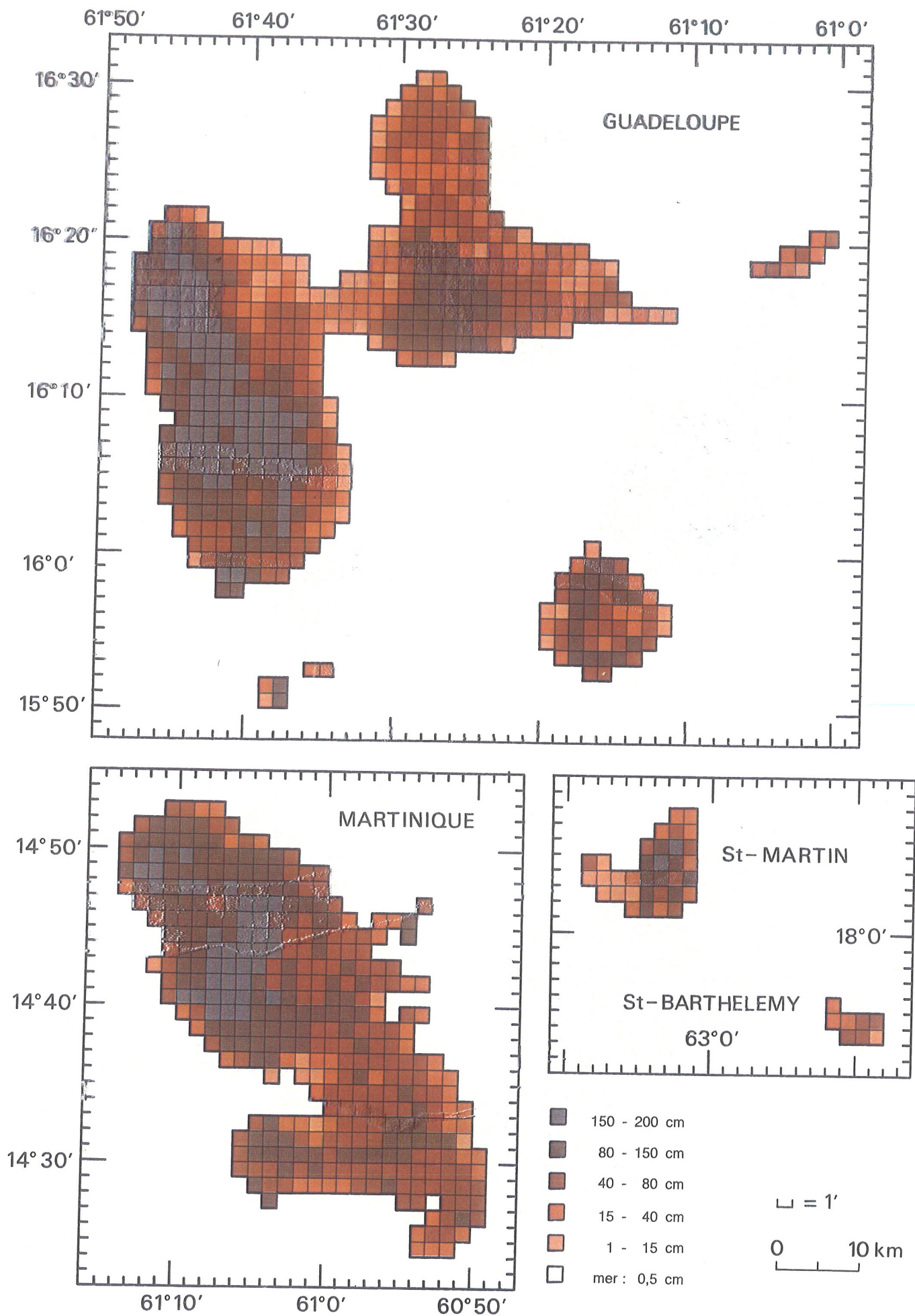
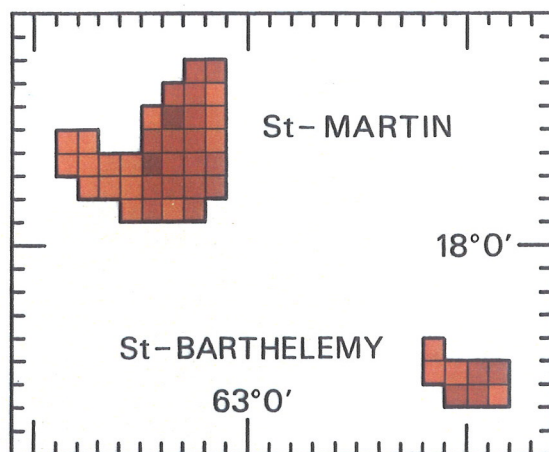
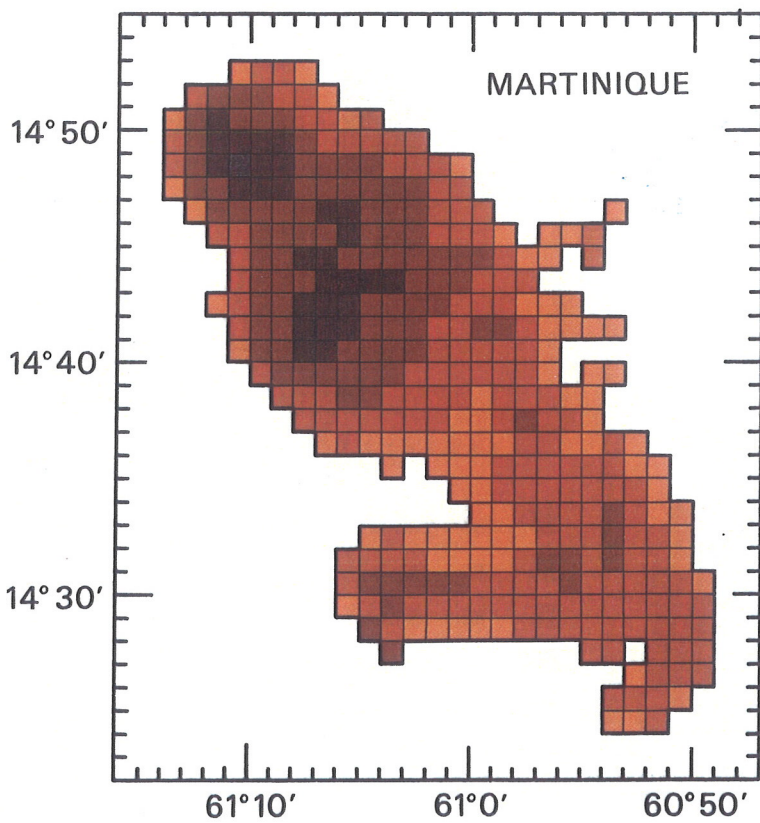
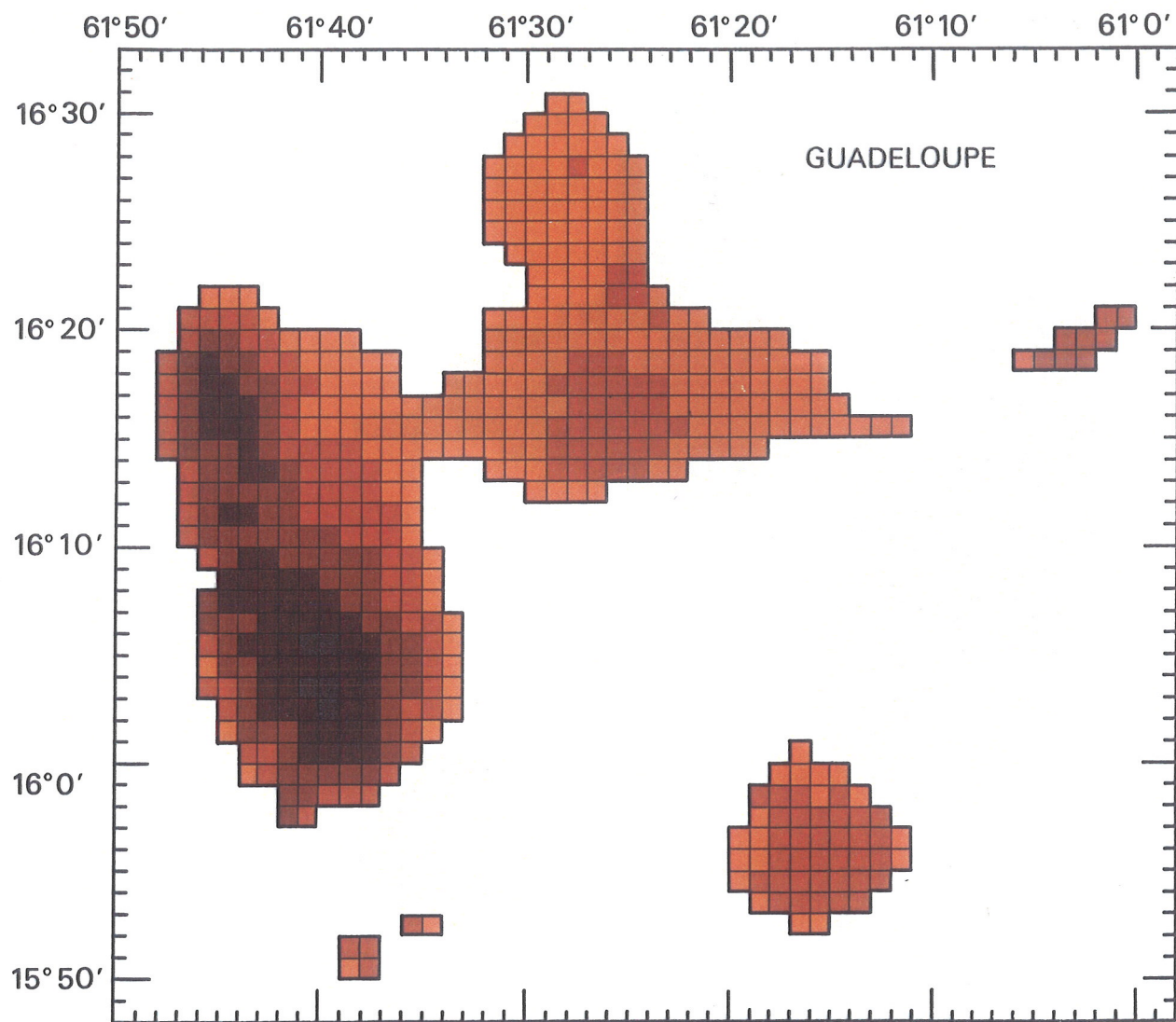


Figure 1 Méso-rugosité des blocs



- 1 000 - 1 300 m
- 500 - 1 000 m
- 200 - 500 m
- 50 - 200 m
- < 50 m
- mer :

□ = 1'

0 10 km

Figure 2 Altitude moyenne des blocs

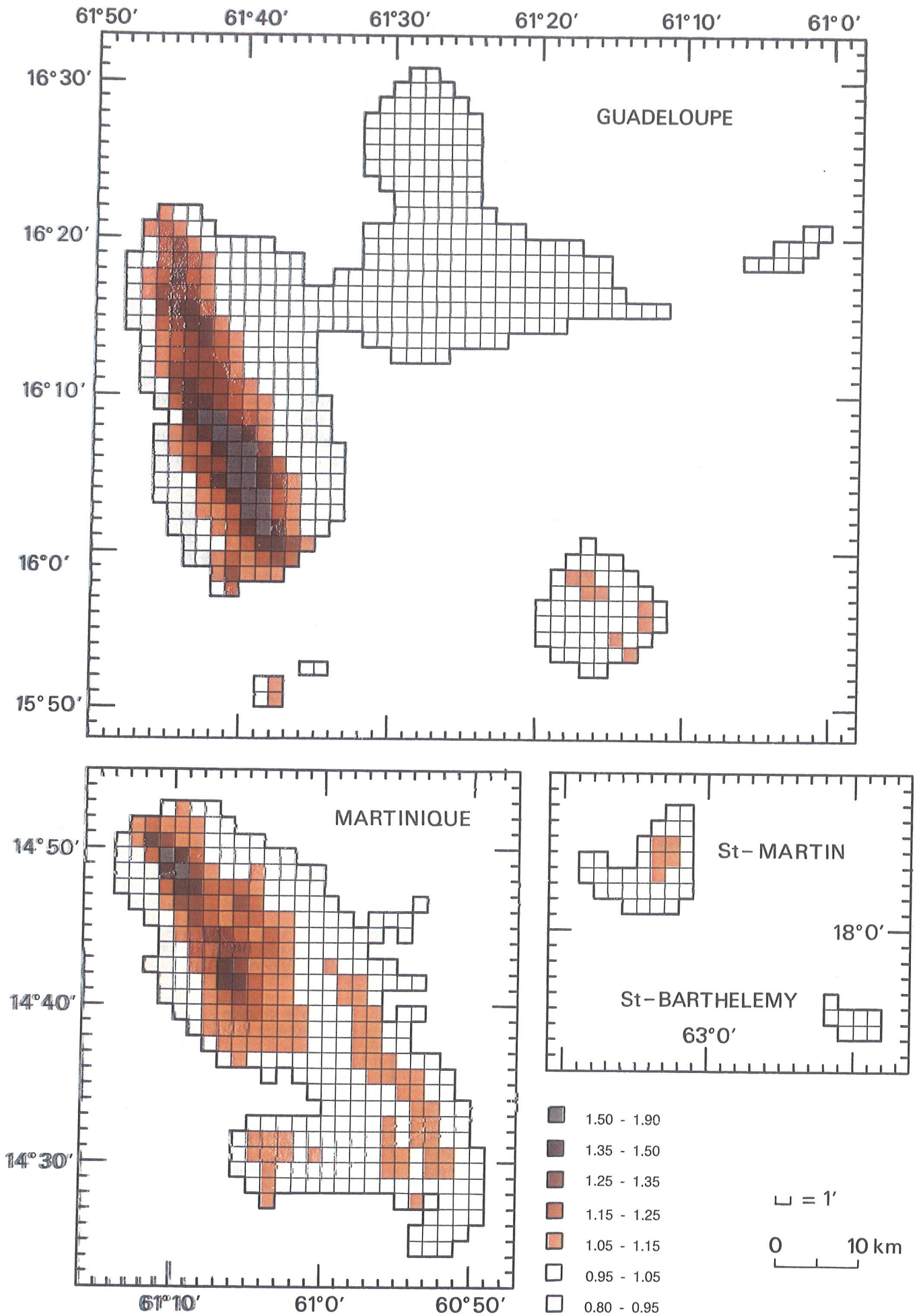


Figure 3 Coefficients de relief - Situation diurne - Direction du vent : 70° (ENE)

3,1 les données de base

Le calcul des caractéristiques moyennes du vent nécessite des mesures sur plusieurs années, ce qui peut être obtenu par les données de vent enregistrées toutes les 3 heures dans les stations du réseau synoptique de la Météorologie Nationale. De plus, aux Antilles, un certain nombre de stations automatiques ont fonctionné sur des périodes relativement courtes entre 1983 et 1985. Ces données ont permis de calibrer le modèle d'interpolation et de mettre en évidence des phénomènes locaux qui n'apparaissent pas nécessairement aux stations du réseau synoptique. L'ensemble des données utilisées sont décrites dans le tableau 3. La situation des stations est donnée à la figure 4 (p. 10).

3,2 le vent de méso-échelle

Le vent mesuré aux stations est fonction de la hauteur de mesure et est perturbé à l'échelle locale par les effets topographiques, les effets de sillage des obstacles proches et la rugosité. Cette vitesse mesurée a donc été corrigée

d'après les caractéristiques de chaque site puis, en appliquant la loi logarithmique au profil de vent, extrapolée à la hauteur de 60 m. On obtient ainsi le vent de méso-échelle au niveau de la station. La méthode de correction des vitesses en fonction des caractéristiques d'un site est donnée en annexe.

La figure 5 donne les distributions du vent de méso-échelle aux stations météorologiques. Ces distributions sont généralement bien ajustées par une loi de Weibull, à l'exception des stations où la fréquence des vents calmes est très importante, en particulier au Lamentin et au Raizet. La fréquence F des vitesses de vent inférieures ou égales à une vitesse V est donc donnée par la relation :

$$F(V) = 1 - \exp(- (V/A)^k) \quad (5)$$

La figure 4 montre les roses des vents aux stations météorologiques. On voit que, aussi bien en Guadeloupe qu'en Martinique, le secteur Est est largement dominant : environ 90 % des directions de vent sont comprises entre 20° et 120° en Martinique, et entre 60° et 160° en Guadeloupe.

Tableau 3 Description des données

Région	Station	Altitude (m)	Période de mesures	Type de données et durée d'intégration	Hauteur de mesures (m)
Martinique	Le Lamentin	3	01/76-12/84	Vitesse et direction (10 min)	10
	Desaix	144	01/76-12/84		22
	Caravelle	33	01/76-12/84		10
	Ajoupa-Bouillon	250	03/83-02/84	Vitesse (1 h)	10
	Diamant	1	03/83-02/84		10
	St-Esprit	30	02/83-02/84		12
	St-Joseph	245	03/83-02/84		12
	St-Pierre	8	03/83-01/84		40
	Morne-Pitault	220	03/84-06/84		10
	Le Lorrain	5	04/84-11/84		8
Bellefontaine	5	02/81-01/82	Vitesse et direction (10 min)	60	
Guadeloupe	Raizet	7	01/77-12/84	Vitesse et direction (10 min)	10
	Désirade	30	01/77-12/84		9
	Basse-Terre	1	07/83-03/84		15
	Jarry	1	10/83-12/83	Vitesse (10 min)	15
	Marie-Galante	181	12/82-04/83		19
St-Barthélemy	Gustavia	47	01/76-12/84	Vitesse et direction (10 min)	11,5

3,3 variations diurnes

On observe que la variation diurne du vent est négligeable aux stations situées sur la côte au vent : Caravelle, Désirade et Marie-Galante. Pour les autres stations, on note un maximum de vent vers 14 h, heure locale, et un minimum vers 5 h (tableau 4). L'amplitude diurne dépasse alors 2 m/s et atteint même 6 m/s au Raizet.

La variation diurne du vent peut provenir de 2 phénomènes :

- soit des effets de brise : la différence de température entre mer et terre induit une circulation de la mer vers la terre le jour et de la terre vers la mer pendant la nuit. Ce phénomène s'accompagne donc d'un changement de direction du vent ;
- soit de la stratification thermique au-dessus de l'île qui favorise les échanges verticaux pendant la journée (stratification instable) et, au contraire, les bloque pendant la nuit (stratification stable). Cet effet n'apparaît pas sur la côte au vent du fait de l'inertie thermique de la mer.

L'analyse détaillée des données de vent montre que ce deuxième phénomène est, de loin, le plus important. Les relations de similitude (équation 1) permettent, par l'intermédiaire des variations diurnes des coefficients A et B, qui dépendent de la stabilité thermique, de paramétrer cet effet.

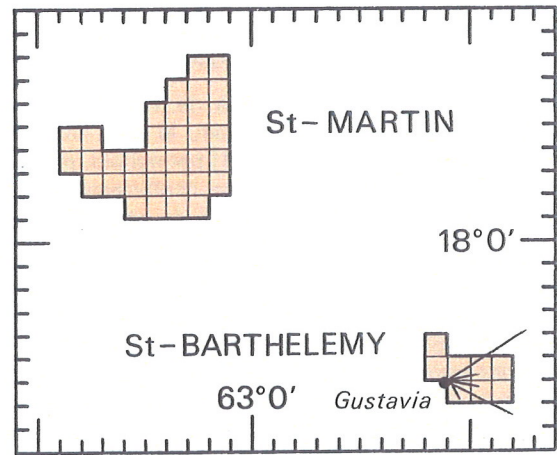
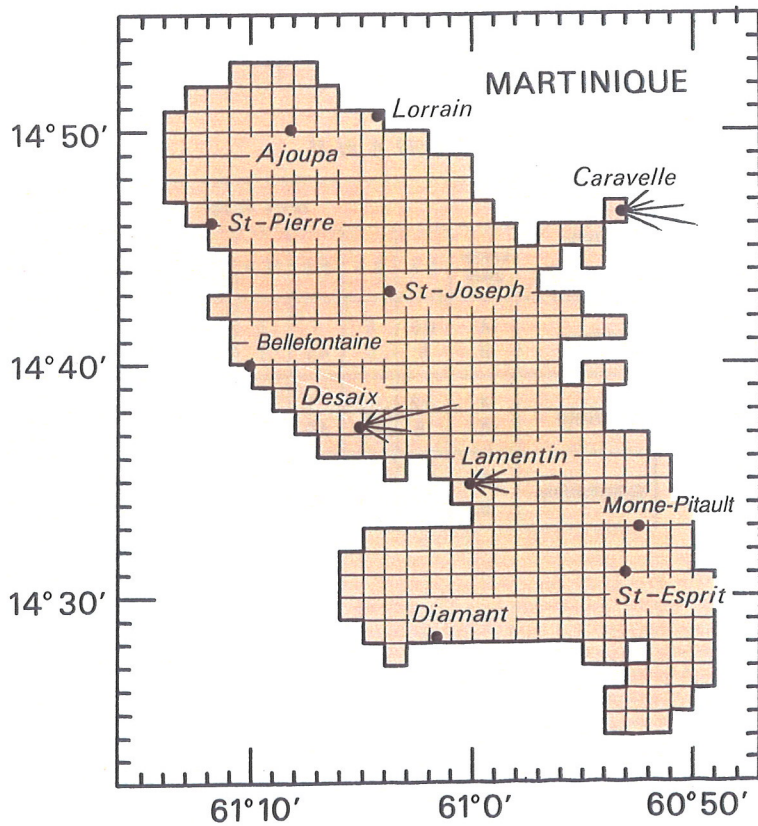
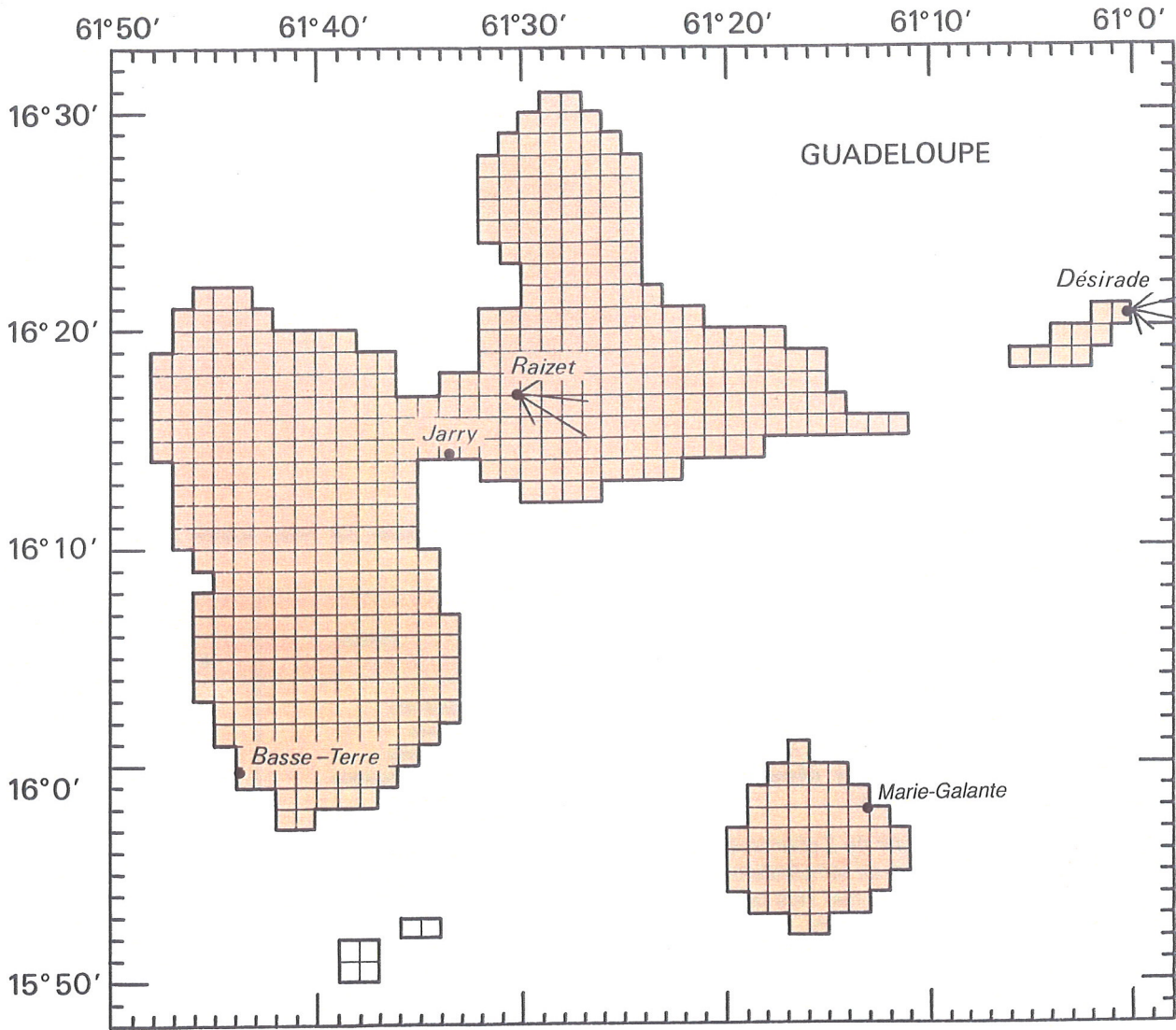
Les valeurs tri-horaires de A et B ont été calées à partir des mesures aux stations météorologiques. A proximité de la mer, sur la côte au vent, la stratification thermique est considérée comme neutre. On prend alors A=1,8 et B=4,5 à toutes les heures de la journée. A une distance supérieure à 2 km de la côte, les effets thermiques sont pleinement pris en compte. La variation diurne de A et B est donnée au tableau 5. Pour les situations intermédiaires (de 1 à 2 km de la côte), une évolution progressive entre ces deux cas est considérée.

Tableau 4 Vent moyen de méso-échelle (m/s) en fonction de l'heure

Région	Station	Heure locale	
		5 h	14 h
Martinique	Lamentin	3,3	8,0
	Desaix	5,3	6,9
	Caravelle	7,1	6,8
	Ajoupa-Bouillon	2,9	5,8
	Diamant	3,6	6,2
	St-Esprit	4,1	7,0
	St-Joseph	4,8	7,2
	St-Pierre	3,0	5,6
	Morne-Pitault	5,9	8,4
	Le Lorrain	5,0	7,1
Bellefontaine	2,5	4,3	
Guadeloupe	Raizet	2,1	8,1
	Désirade	7,3	6,7
	Basse-Terre	4,2	7,4
	Jarry	3,5	7,4
	Marie-Galante	5,6	6,0
	Gustavia	4,9	6,4

Tableau 5 Coefficients A et B

Région	Coefficient	Heure locale							
		2 h	5 h	8 h	11 h	14 h	17 h	20 h	23 h
Martinique	A	0,5	0	1	4	4	3	1	1
	B	5	5	4,5	3	3	3,5	4,5	4,5
Guadeloupe	A	-2	-2	1	5	5	3,5	-0,5	-1
	B	8	8	4,5	2	2	3,5	5	6
St-Barthélemy	A	0,5	0	1,8	3,0	3,0	1,8	1,0	1,0
	B	5	5	4,5	4,0	4,0	4,5	4,5	4,5



□ = 1'
 0 10 km

Figure 4 Rose des vents aux stations (secteurs de 20°)

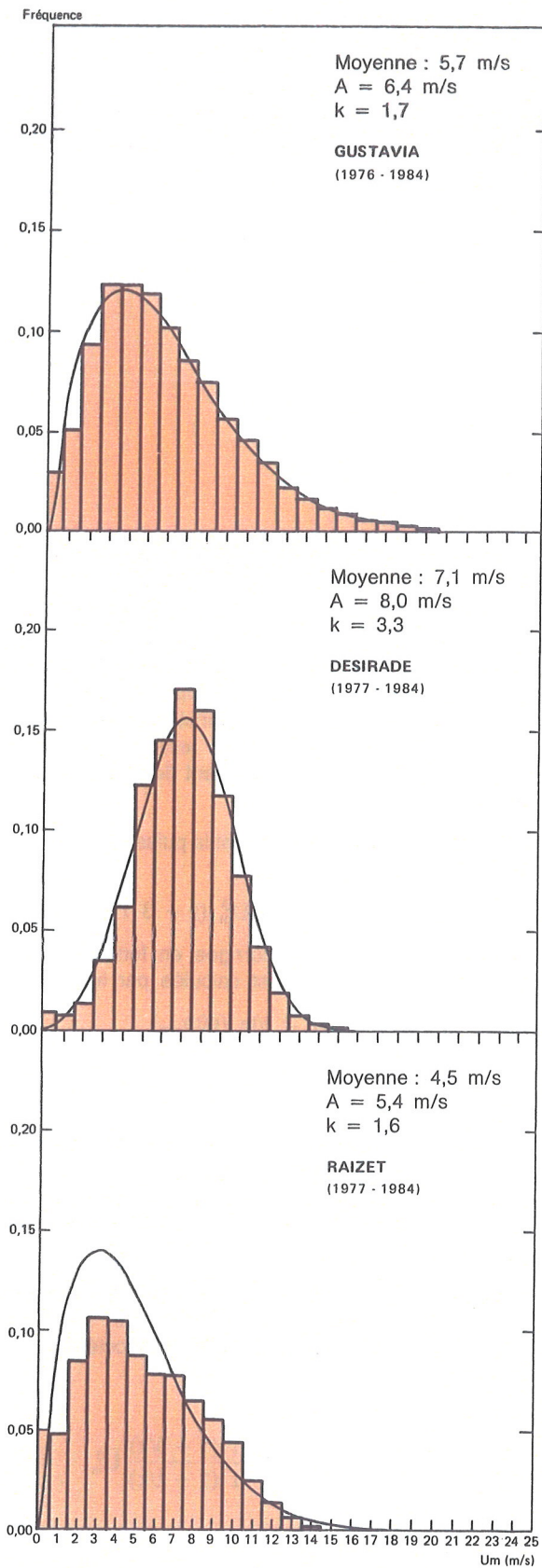
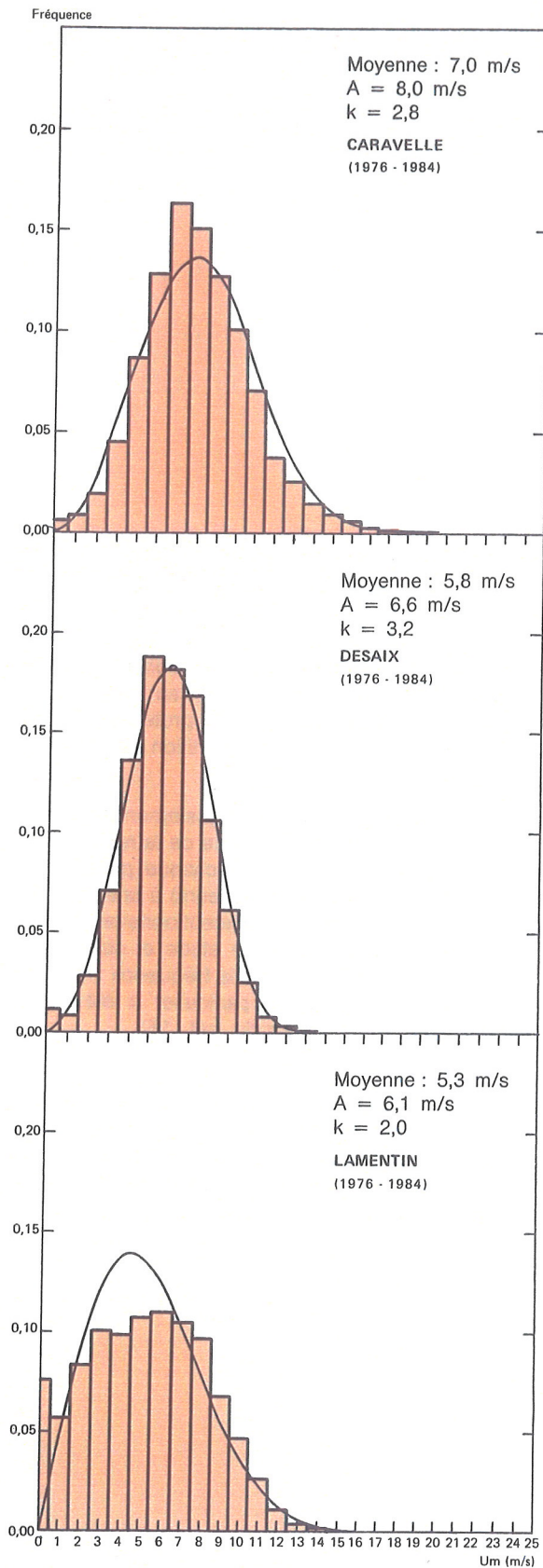


Figure 5 Distribution du vent de méso-échelle, à 60 m de hauteur aux stations météorologiques

4,1 méthode d'interpolation

A partir du vent mesuré en une station de référence située sur la côte au vent, la relation (1) permet de calculer le vent de macro-échelle, supposé uniforme sur toute l'île. De même, connaissant la valeur des coefficients A et B en chaque bloc et à chaque heure, et les caractéristiques de méso-échelle : méso-rugosité et coefficient de relief en chaque bloc, la relation (1) permet le calcul du vent de méso-échelle U_m en chaque bloc.

On peut alors calculer également la puissance du vent à 60 m de hauteur par la relation :

$$P = 0,5 \rho U_m^3 (1 + 3 I^2)$$

La densité de l'air ρ est corrigée en fonction de l'altitude, l'intensité de turbulence est calculée par les relations :

$$I = 1/\ln(60/z_{om})$$

si $z_{om} \leq 20 \text{ cm}$

$$\text{et } I = (-0,14 \ln(z_{om}) + 0,78)/\ln(60/z_{om}) \quad (6)$$

si $z_{om} > 20 \text{ cm}$

Les calculs de U_m et P sont effectués, pour chaque valeur tri-horaire du vent, pendant 8 années de mesure à La Désirade, et 9 à La Caravelle et à Gustavia. On en déduit la vitesse moyenne du vent et l'énergie disponible annuellement à 60 m de hauteur.

Connaissant la puissance moyenne \bar{P} et la vitesse moyenne \bar{U}_m en chaque point, on peut déterminer le paramètre de forme k de la distribution de Weibull associée par la relation implicite :

$$\bar{P} = 0,5\rho (1 + 3 I^2) \frac{\Gamma(1 + 3/k)}{\Gamma(1 + 1/k)} \bar{U}_m^3$$

Le paramètre d'échelle A étant obtenu par :

$$A = U_m/\Gamma(1 + 1/k)$$

(la fonction Γ est définie par $\Gamma(x) = \int_0^{\infty} t^{x-1} e^{-t} dt$).

4,2 cartographies

La figure 6 présente la vitesse moyenne du vent à 60 m de hauteur en chaque point du maillage. L'influence de la mer apparaît nettement sur la côte au vent. Les zones en altitude sont d'autre part bien ventées, alors qu'au contraire, les régions en aval de la montagne sont très protégées. L'énergie éolienne annuelle présente une répartition géographique semblable (fig.7).

Les cartes des paramètres A et k de l'ajustement de Weibull sont données aux figures 8 et 9. A l'aide de la relation (5), il est donc possible de déterminer, en chaque point, la fréquence des vents inférieurs (ou supérieurs) à une vitesse V donnée. Il faut noter que les vents exceptionnellement forts n'entrent pas dans le cadre de cette étude et donc que la relation (5) ne permet pas d'estimer la fréquence des vents supérieurs à 20/s. Ce problème particulier a été abordé précédemment dans un autre article (réf. 15).

Le paramètre de forme k est généralement plus élevé sur la côte au vent, ce qui correspond à une distribution plus symétrique. A l'intérieur de l'île et sur la côte sous le vent, la stabilité thermique nocturne augmente la fréquence des vents faibles et rend la distribution dissymétrique. Le paramètre de forme y est donc moins élevé.

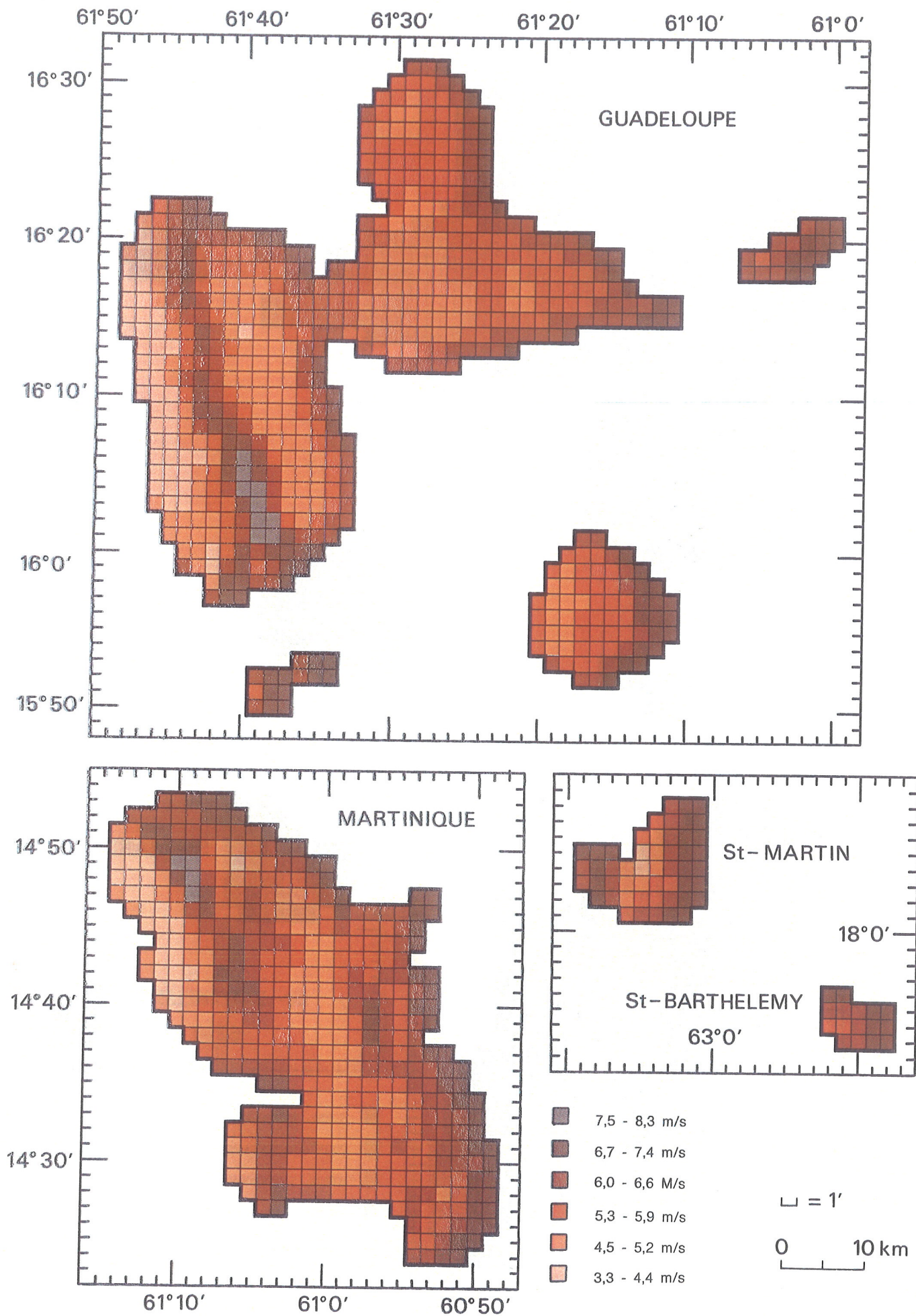
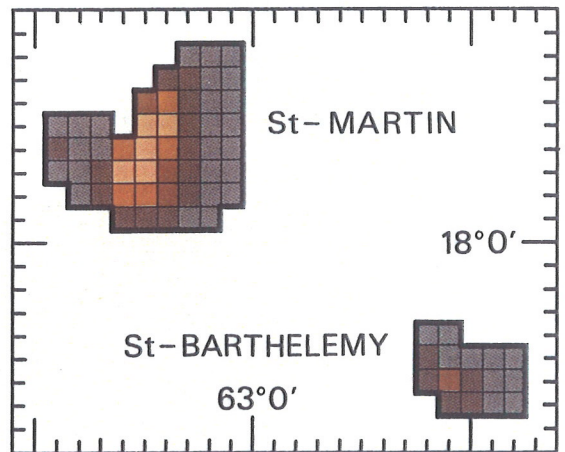
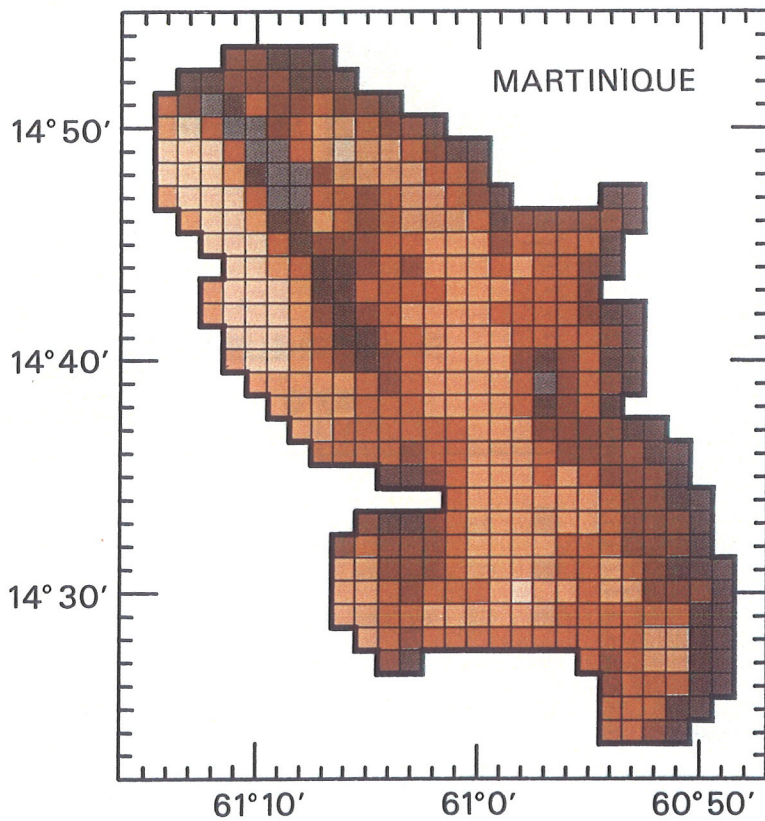
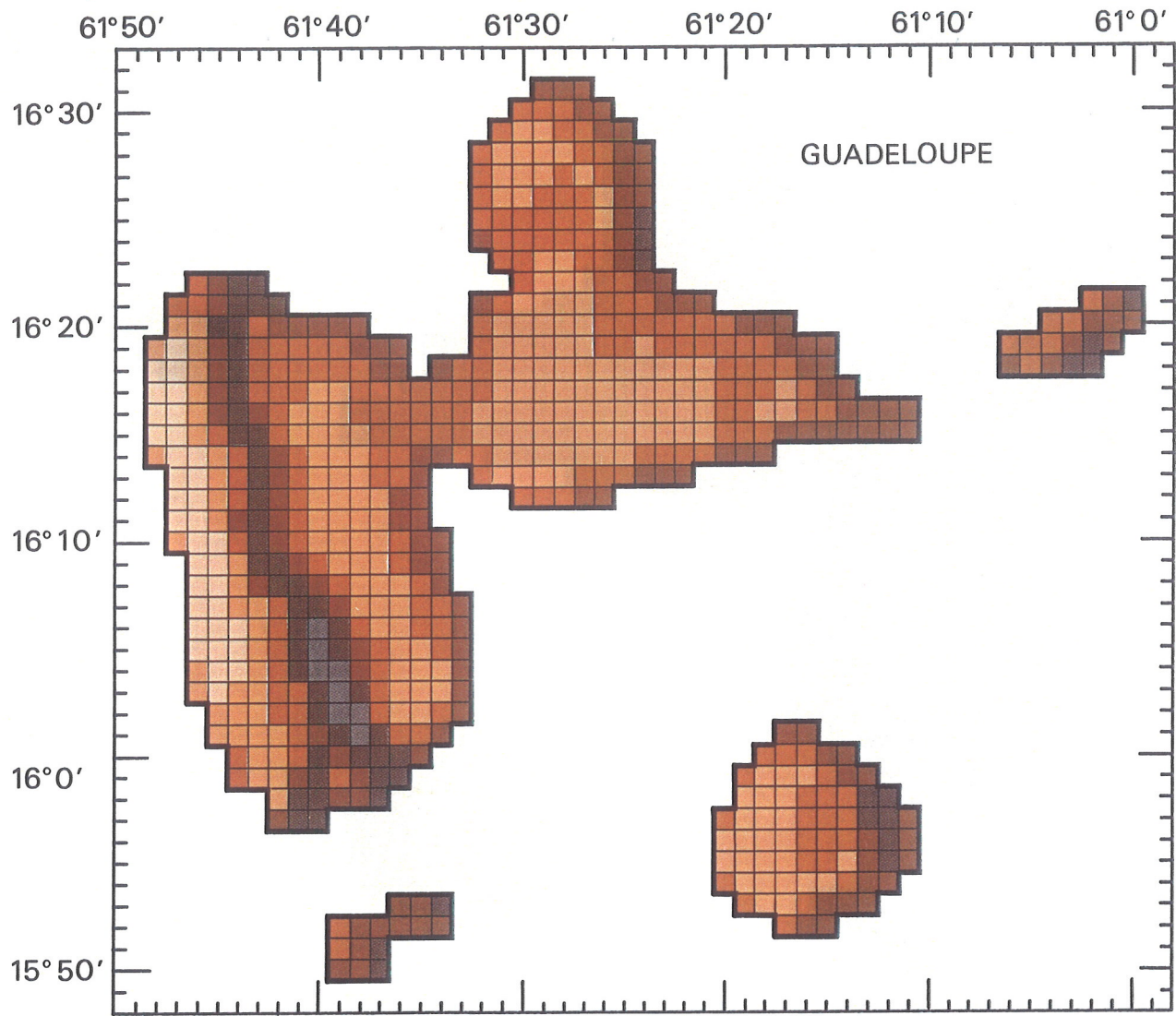


Figure 6 Vent moyen à 60 m de hauteur



- 3 500 - 5 700 kWh/m²
- 2 500 - 3 500 kWh/m²
- 2 000 - 2 500 kWh/m²
- 1 500 - 2 000 kWh/m²
- 1 000 - 1 500 kWh/m²
- 700 - 1 000 kWh/m²

□ = 1'

0 10 km

Figure 7 Énergie éolienne annuelle à 60 m de hauteur

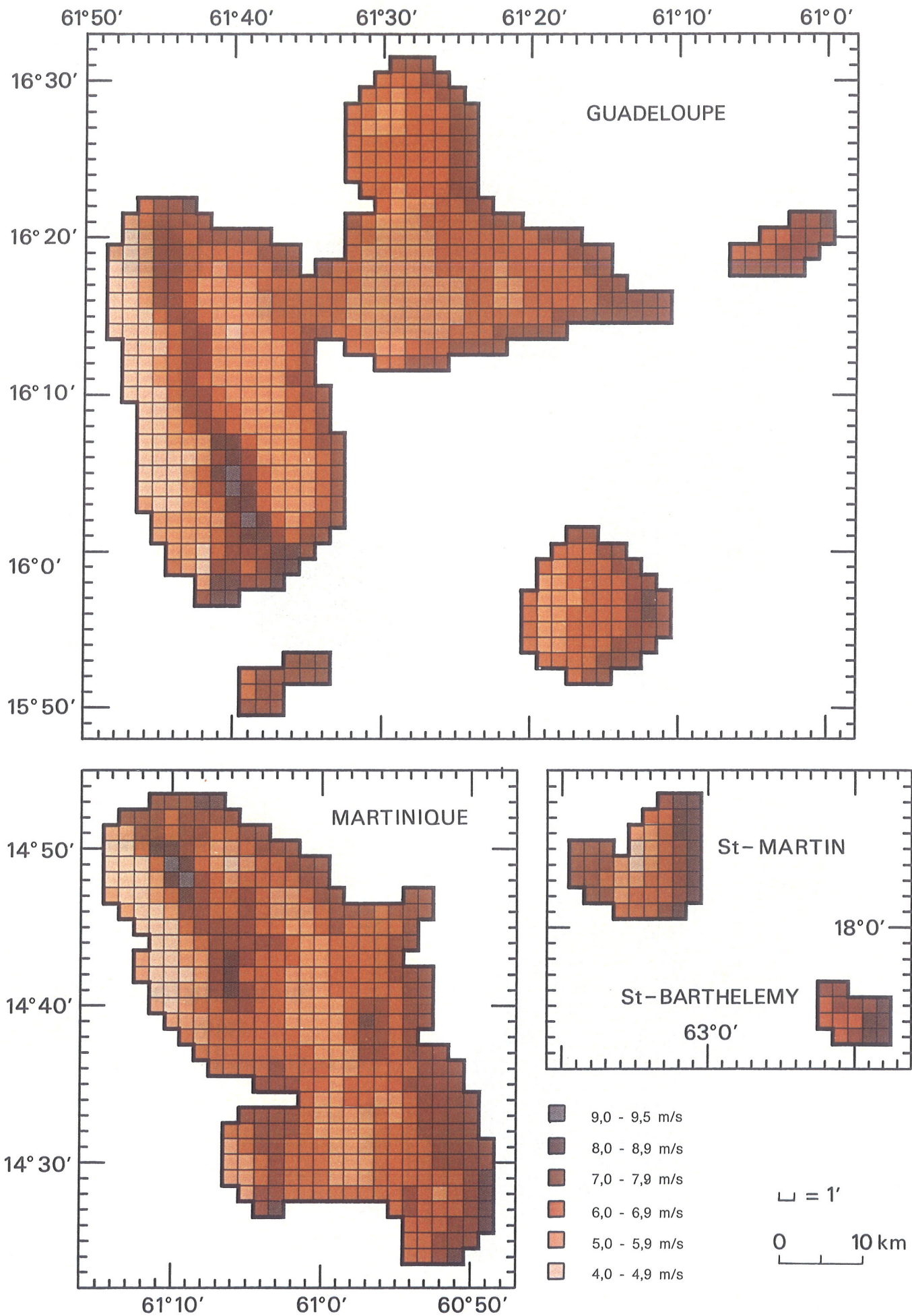


Figure 8 Paramètre d'échelle de la distribution de Weibull (60 m de hauteur)

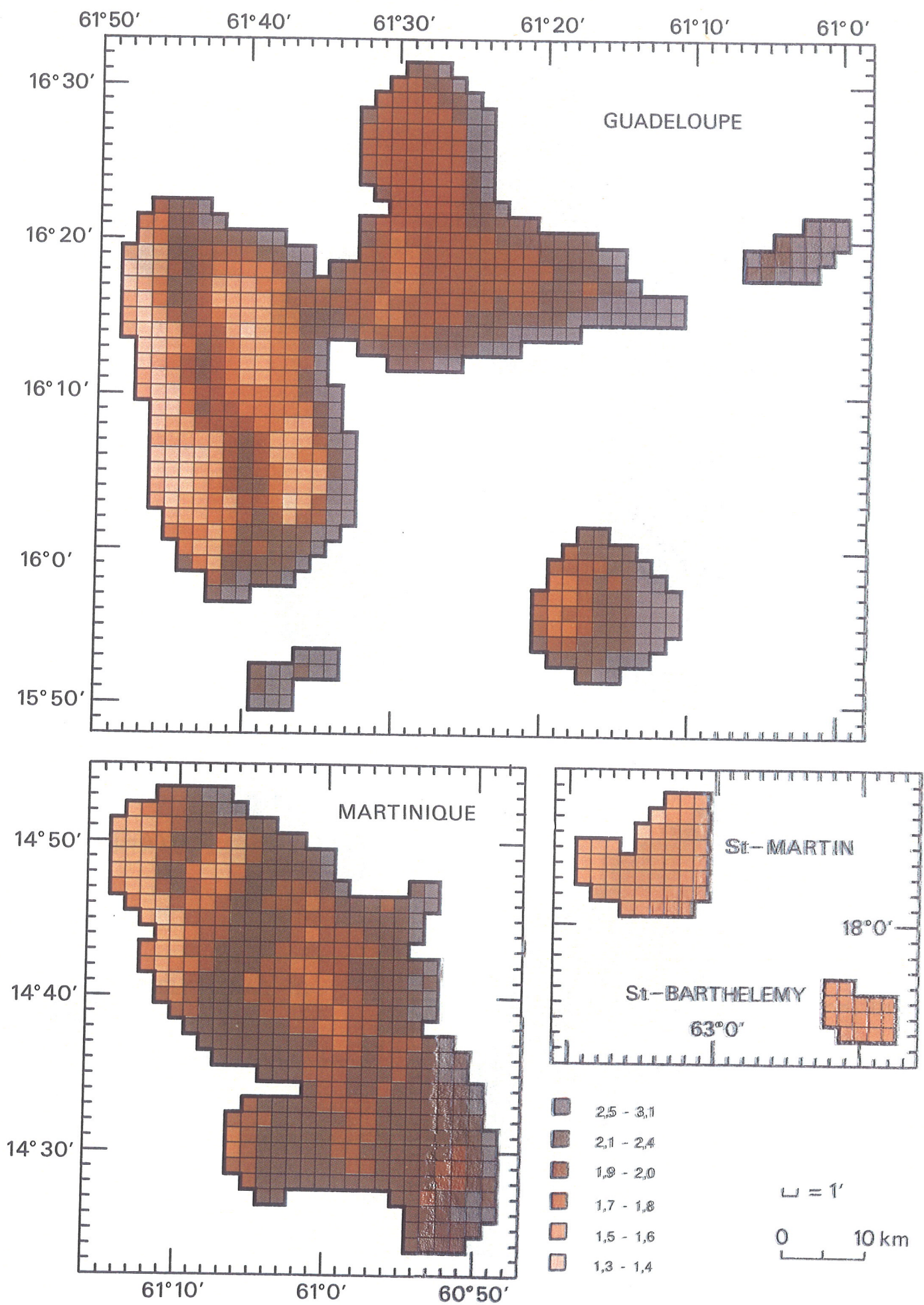


Figure 9 Paramètre de forme de la distribution de Weibull (60 m de hauteur)

Les résultats présentés au chapitre 4 correspondent à une hauteur de 60 m. Pour estimer les caractéristiques du vent à une hauteur inférieure, il est nécessaire de tenir compte des caractéristiques locales du site. Suivant le degré de complexité du site (homogène, non homogène, complexe) la méthode utilisée sera différente.

5,1 site homogène

Il s'agit d'une zone plate ou faiblement ondulée dont la nature du terrain est identique, dans toutes les directions, sur une distance de plusieurs kilomètres au vent du site. Il ne doit pas y avoir d'obstacle important à proximité immédiate. Pour les Antilles, ces conditions peuvent être réservées au seul secteur compris entre le NNE et le SEE, qui recouvre plus de 95 % des directions de vent.

Dans ce cas, le profil vertical de vitesse suit une loi logarithmique. La vitesse du vent U_h à la hauteur h peut être déduite du vent de méso-échelle U_m donné par la cartographie au point le plus proche par :

$$U_h = U_m \ln(h/z_o) / \ln(60/z_o)$$

z_o étant la rugosité du site déterminée en fonction du type de terrain (cf. tableau 1)

De même, la loi logarithmique permet d'écrire, pour l'énergie éolienne E_h disponible à la hauteur h , en fonction de l'énergie E_{60} donnée par la carte :

$$E_h = E_{60} \frac{1 + 3 I_h^2}{1 + 3 I_{60}^2} \left(\frac{\ln(h/z_o)}{\ln(60/z_o)} \right)^3$$

I_h et I_{60} sont calculées par les relations (6).

Le tableau 6 donne, pour différentes hauteurs et différents types de terrain, le rapport entre les caractéristiques du vent à la hauteur h et les caractéristiques fournies par la carte. Le rapport des paramètres d'échelle est le même que le rapport des vitesses et le paramètre de forme k peut être supposé invariant avec la hauteur.

Tableau 6 Rapports entre caractéristiques moyennes du vent à la hauteur h et à 60 m de hauteur, en fonction du type de terrain

	h (m)	Catégorie de terrain (*)					
		I	II	III	IV	V	VI
		Rugosité (m)					
		0,005	0,02	0,07	0,25	0,40	1,00
Vitesse	10	0,81	0,76	0,73	0,67	0,64	0,56
	20	0,88	0,86	0,84	0,80	0,78	0,73
	30	0,93	0,91	0,90	0,87	0,86	0,83
	40	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,90
	50	0,98	0,98	0,97	0,97	0,96	0,96
Énergie	10	0,53	0,45	0,40	0,30	0,27	0,18
	20	0,69	0,63	0,59	0,51	0,48	0,39
	30	0,79	0,75	0,72	0,67	0,64	0,57
	40	0,88	0,85	0,83	0,79	0,78	0,73
	50	0,94	0,93	0,92	0,90	0,89	0,87

* Voir tableau 1

5,2 sites non homogènes

Suivant les directions de vent, le site présente alors des natures de terrain différentes ou une topographie peu complexe.

Le vent moyen dans la direction i , à la hauteur h , peut s'écrire en fonction du vent moyen dans cette même direction, à 60 m de hauteur :

$$U_i(h) = U_{m_i} \times C_{h_i} \times C_{T_i} \times C_{S_i}$$

Les coefficients C_{h_i} , C_{T_i} , C_{S_i} correspondent aux corrections de hauteur, topographie et sillage dans la direction i . La méthode pour les calculer est donnée en annexe.

La vitesse moyenne à la hauteur h peut alors être déterminée par :

$$U(h) = \sum_{i=1}^5 f_i U_{m_i} C_{h_i} C_{T_i} C_{S_i}$$

où f_i est la fréquence du secteur de direction i (donnée au tableau 7). Les vitesses moyennes U_{m_i} pour ces 5 secteurs sont données aux figures 10 à 14.

Tableau 7 Coefficients f_i suivant les régions

	N° de secteur				
	1	2	3	4	5
	Secteur (en degrés)				
	10 - 50	50 - 90	90 - 130	130 - 170	170 - 210
Martinique	0,10	0,38	0,43	0,06	0,03
Guadeloupe	0,04	0,35	0,43	0,14	0,04
St-Barthélémy	0,05	0,42	0,32	0,14	0,05

5,3 sites complexes

Ce sont les régions montagneuses ou très vallonnées (collines nombreuses et élevées), les côtes abruptes, les sites comportant de nombreux obstacles dans leur environnement immédiat. Dans ce cas, il est généralement nécessaire d'effectuer des mesures de vent sur le site d'implantation et de les comparer avec celles d'une station météorologique de référence. Cependant, les caractéristiques du vent à 60 m, données par les cartes, peuvent être utilisées comme vent de référence, soit pour des études en soufflerie aérodynamique, soit pour une simulation numérique.

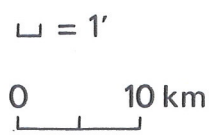
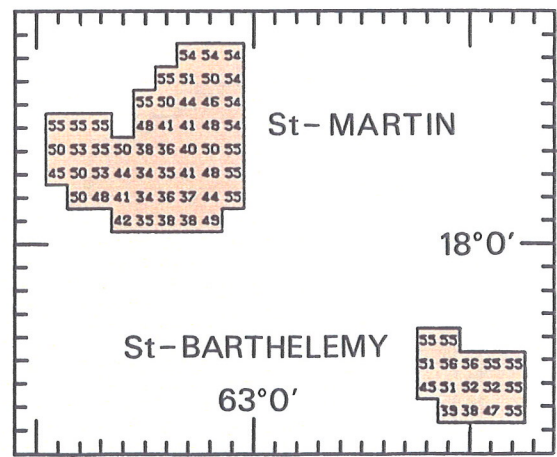
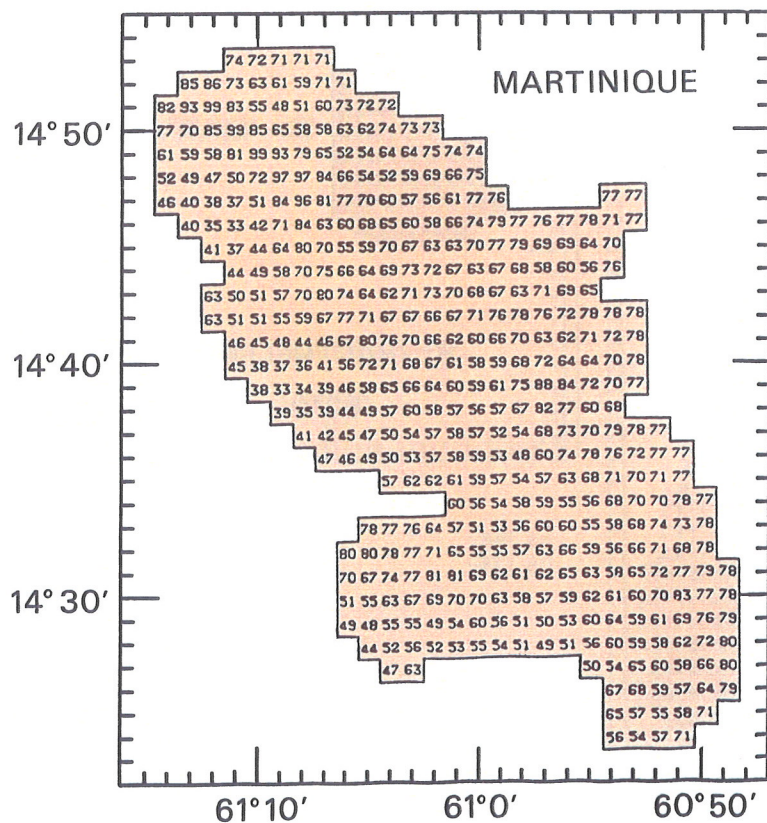
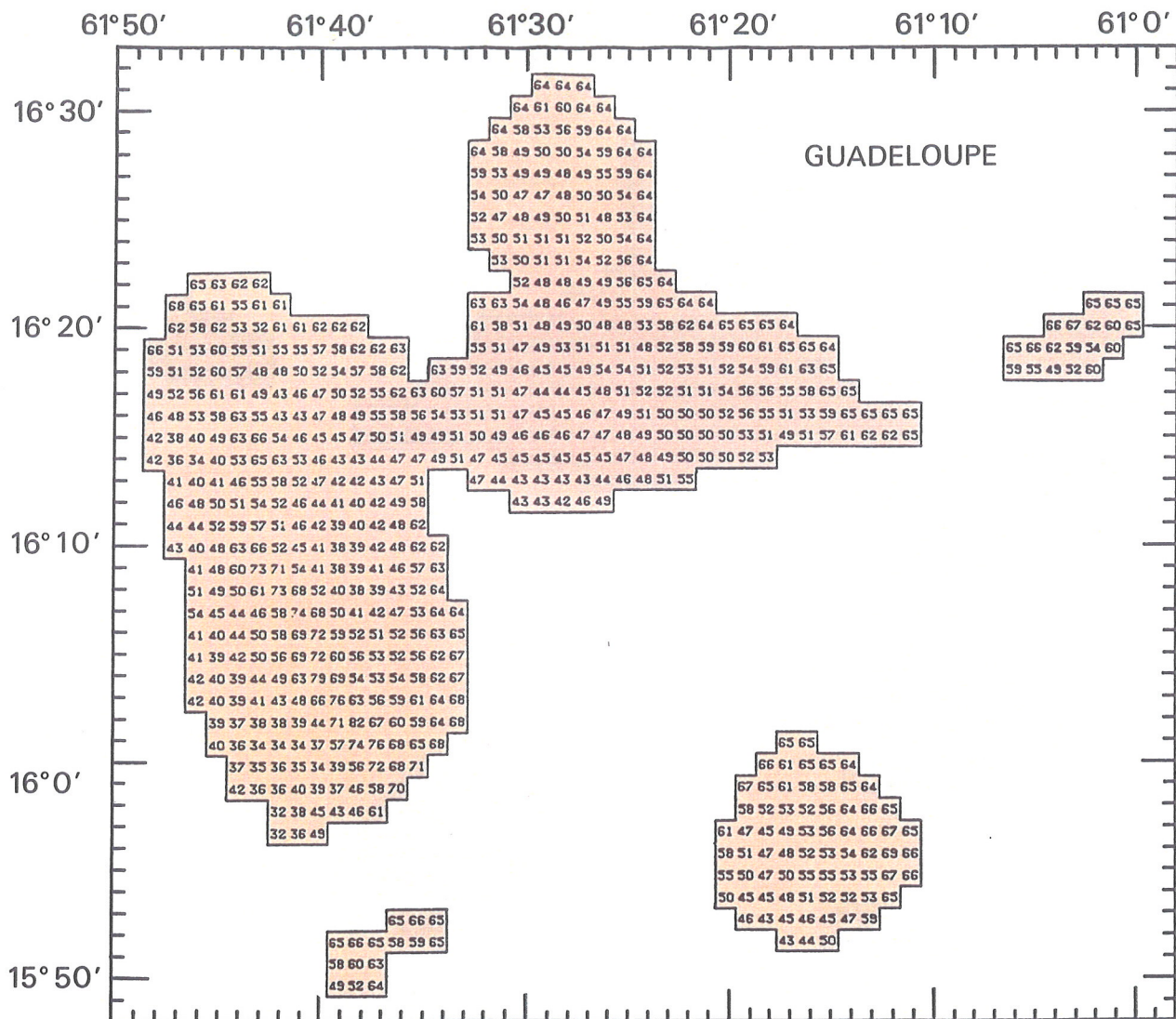
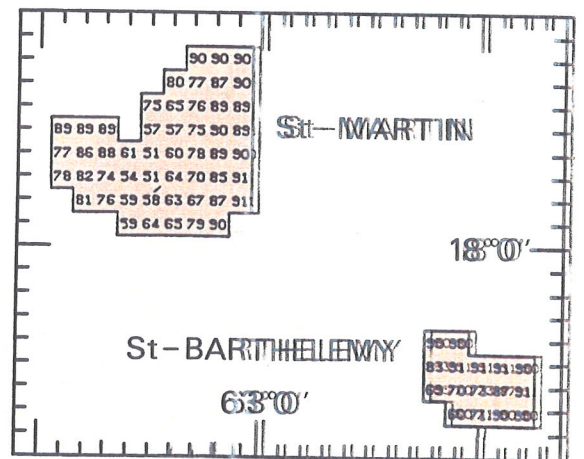
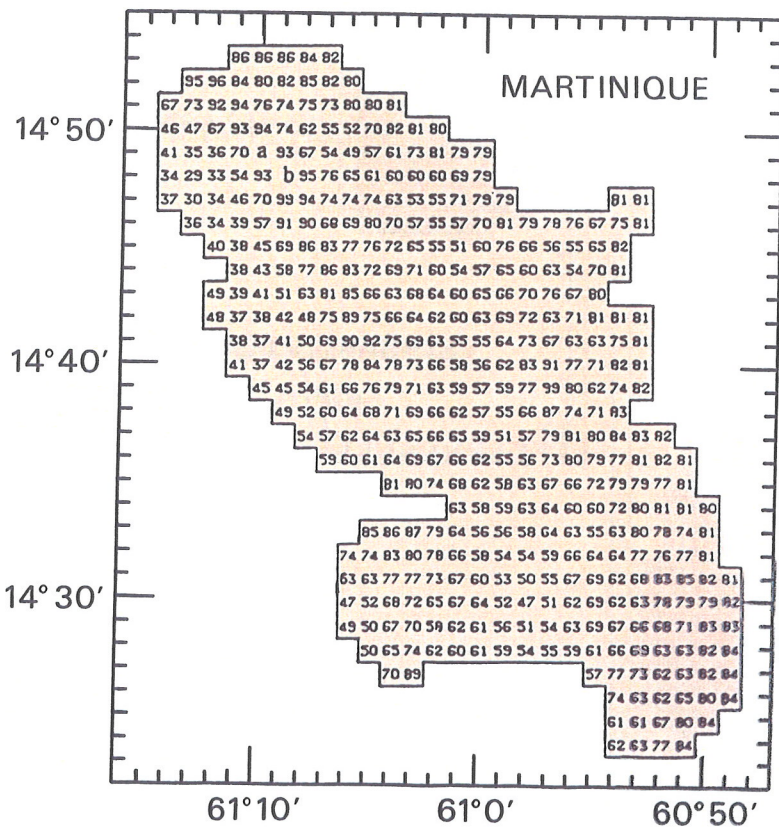
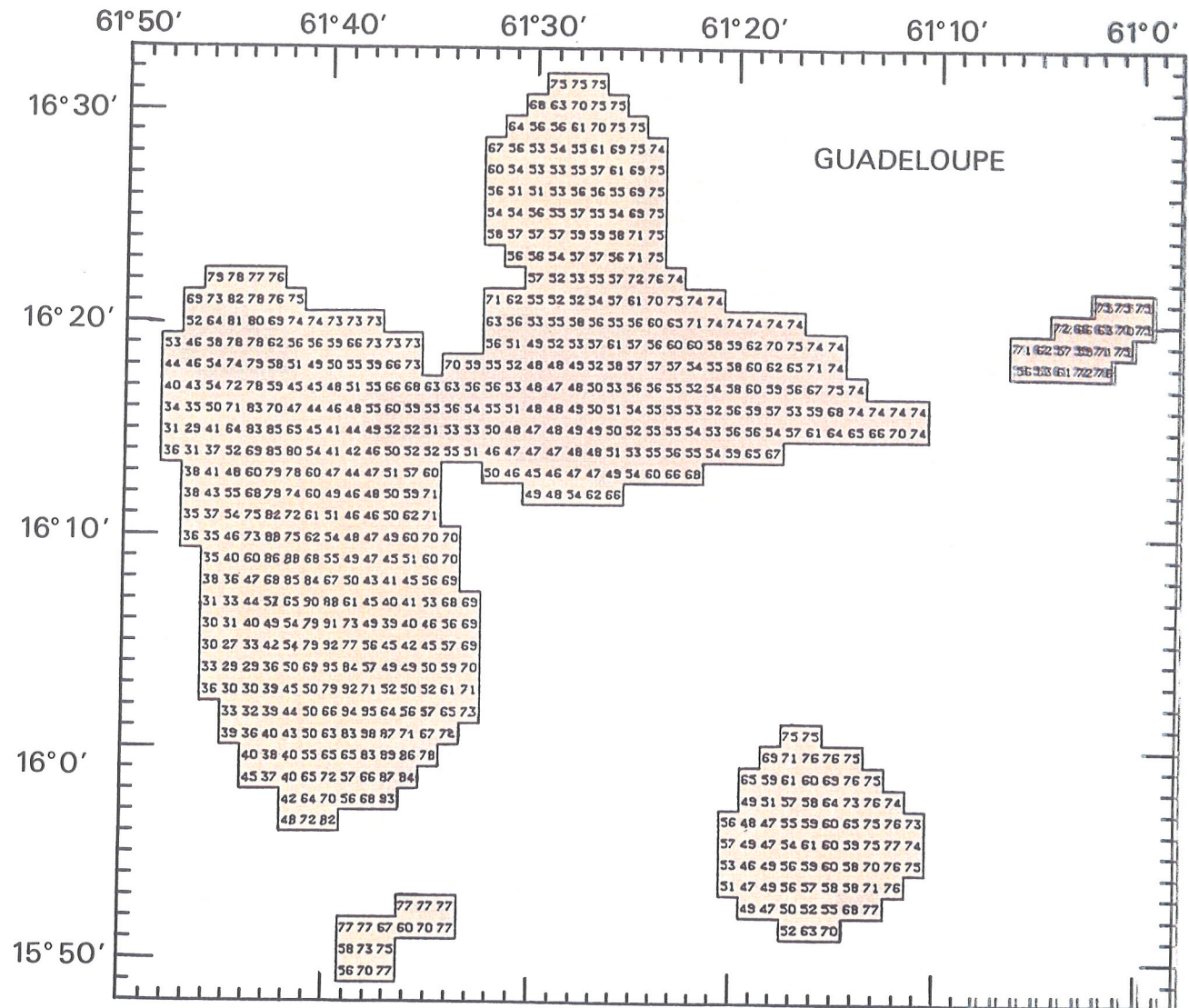


Figure 10 Vitesse moyenne à 60 m de hauteur pour le secteur 1 (NNE, directions 10° - 50°) (dixièmes de m/s)



a : 107
b : 113

U = 11'

0 100km

Figure 11 Vitesse moyenne à 60 m de hauteur pour le secteur 2 (ENE, directions 50° - 90°) (vitesse en m/s)

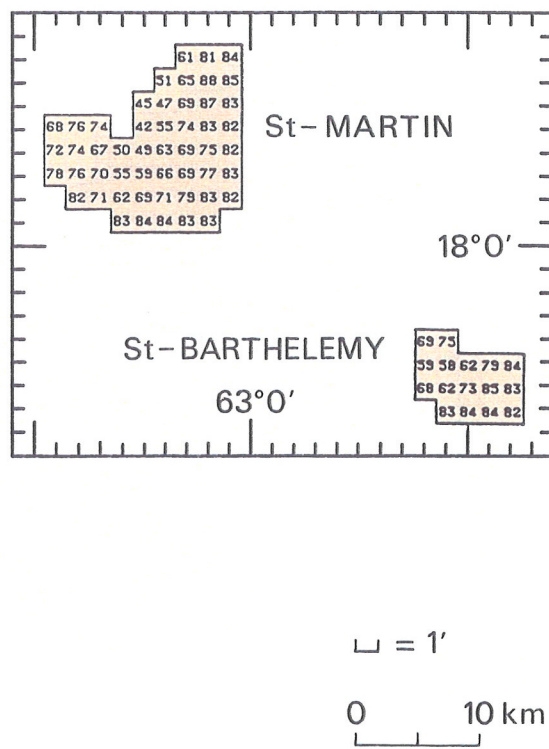
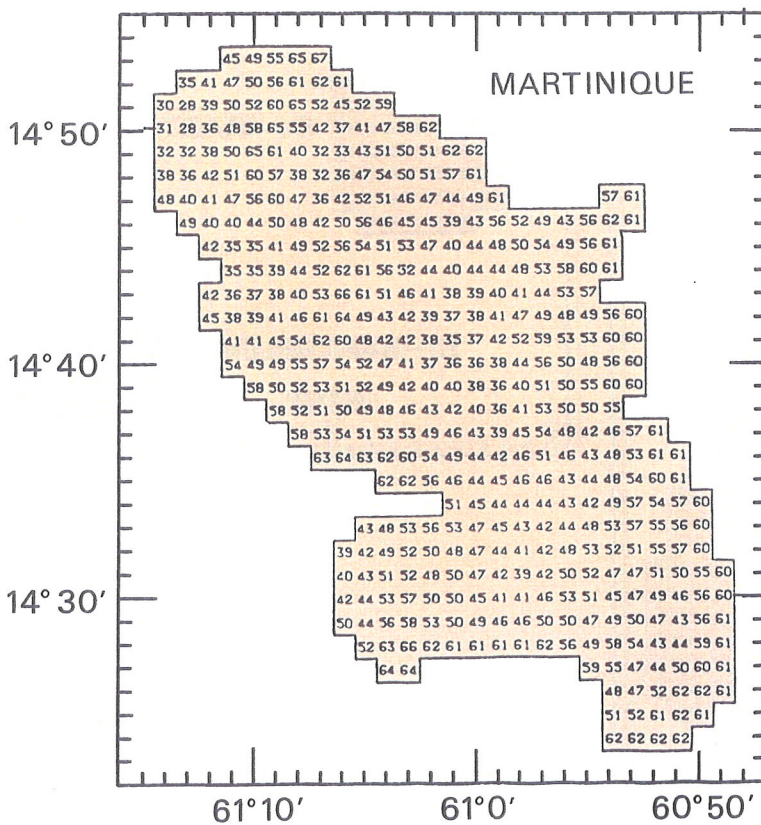
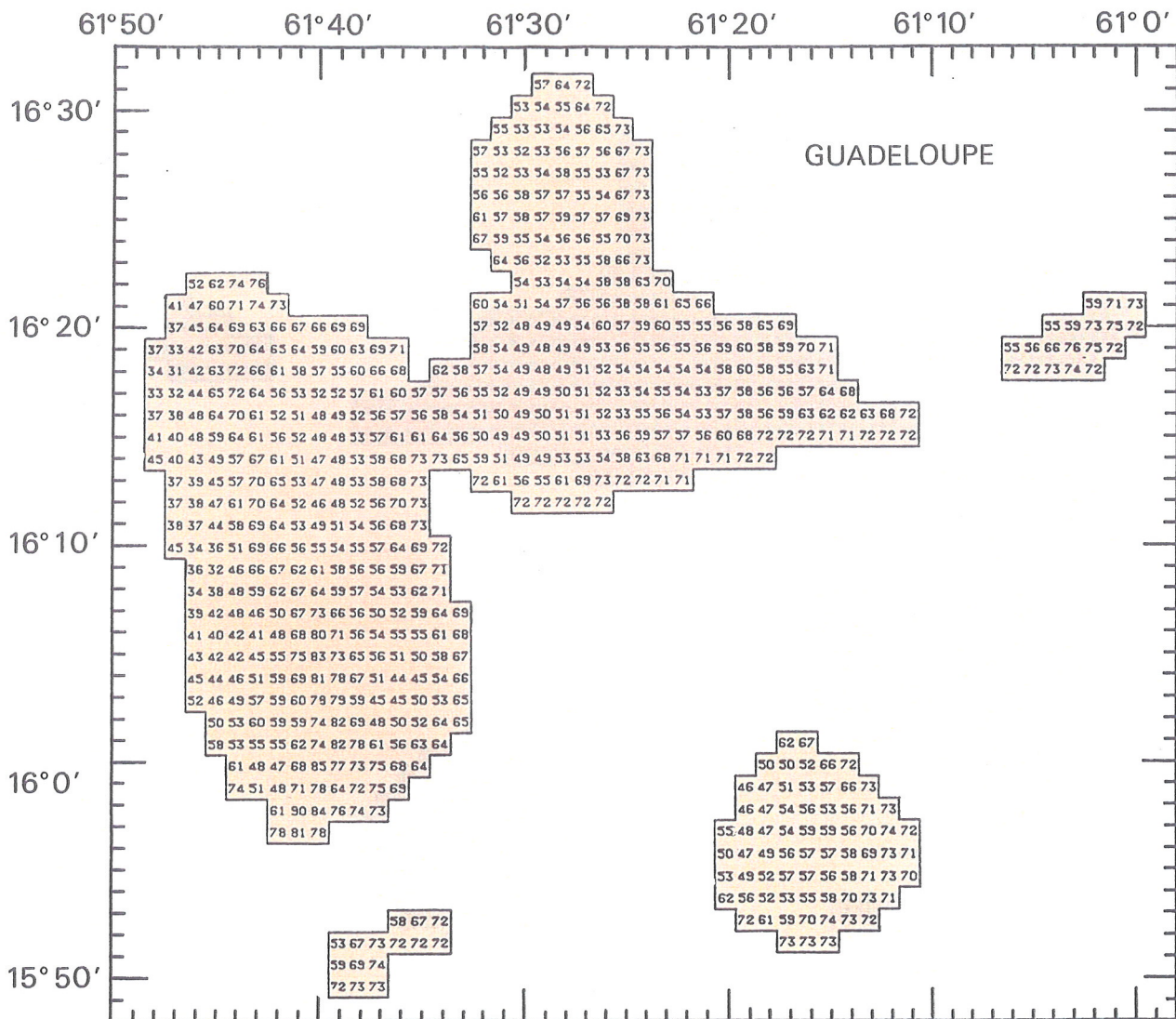


Figure 12 Vitesse moyenne du vent à 60 m de hauteur pour le secteur 3 (ESE, directions 90° - 130°) (dixièmes de m/s)

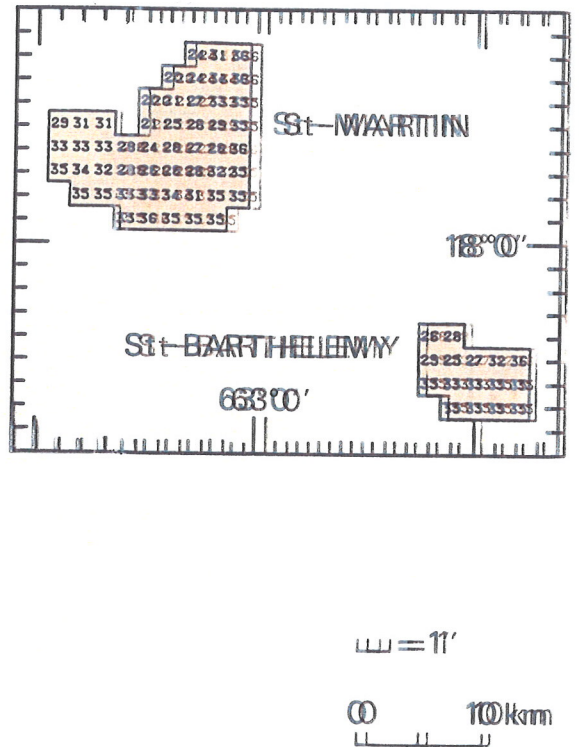
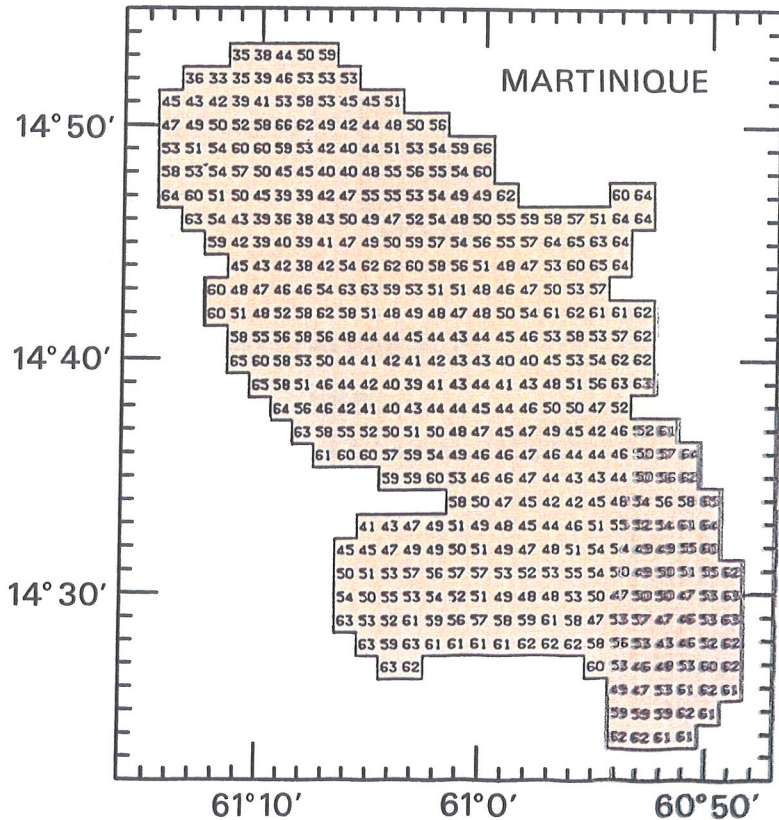
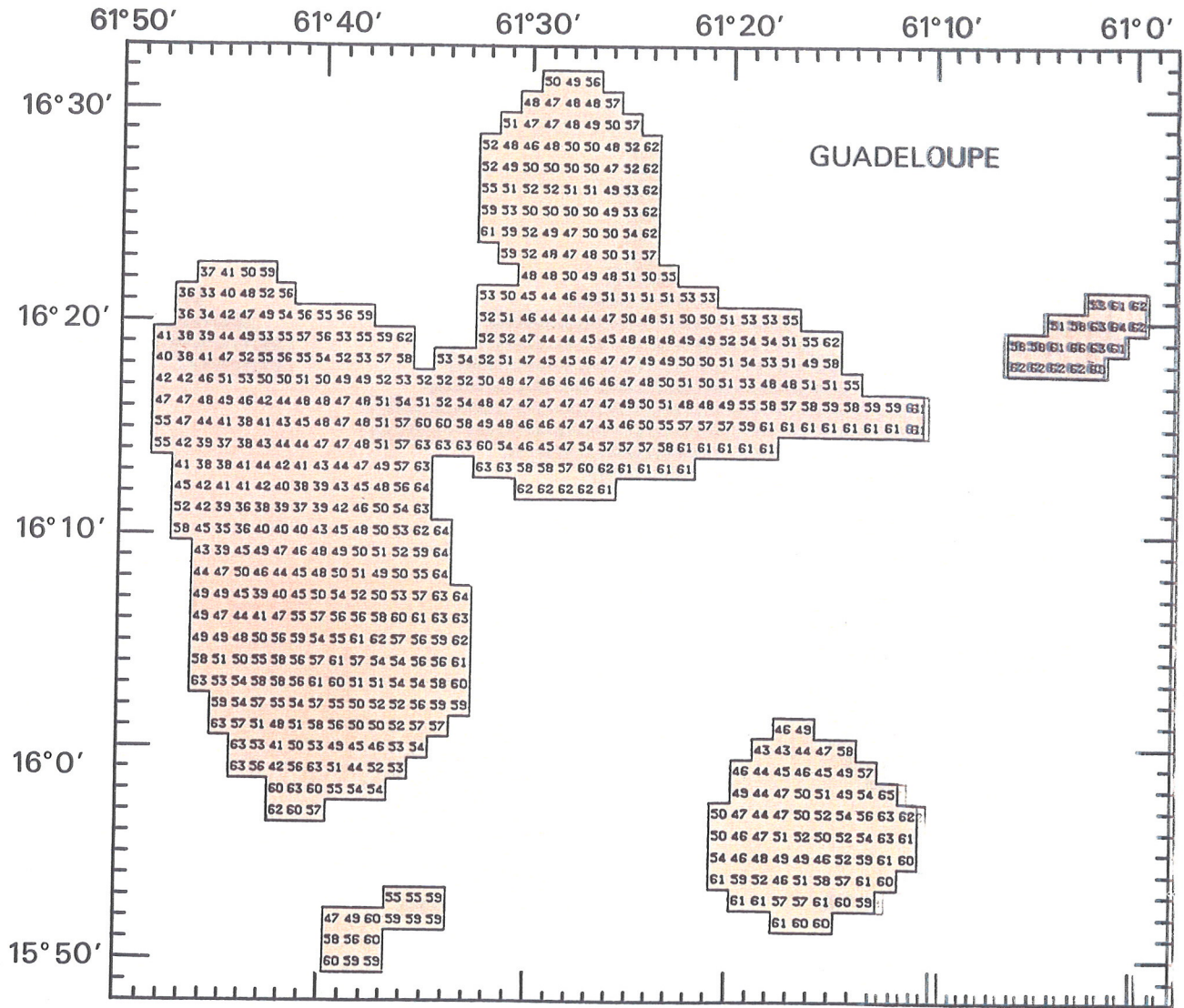


Figure 13 Vitesses moyennes du vent à 60 m de hauteur pour le secteur 4 (SSE, directions 130°-170°) (directions de mètres)

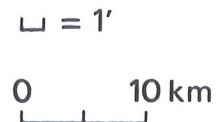
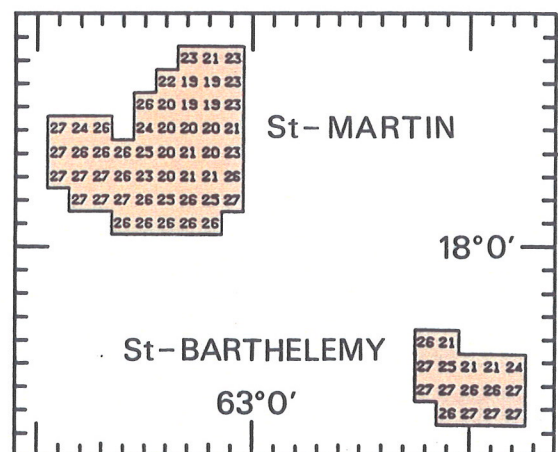
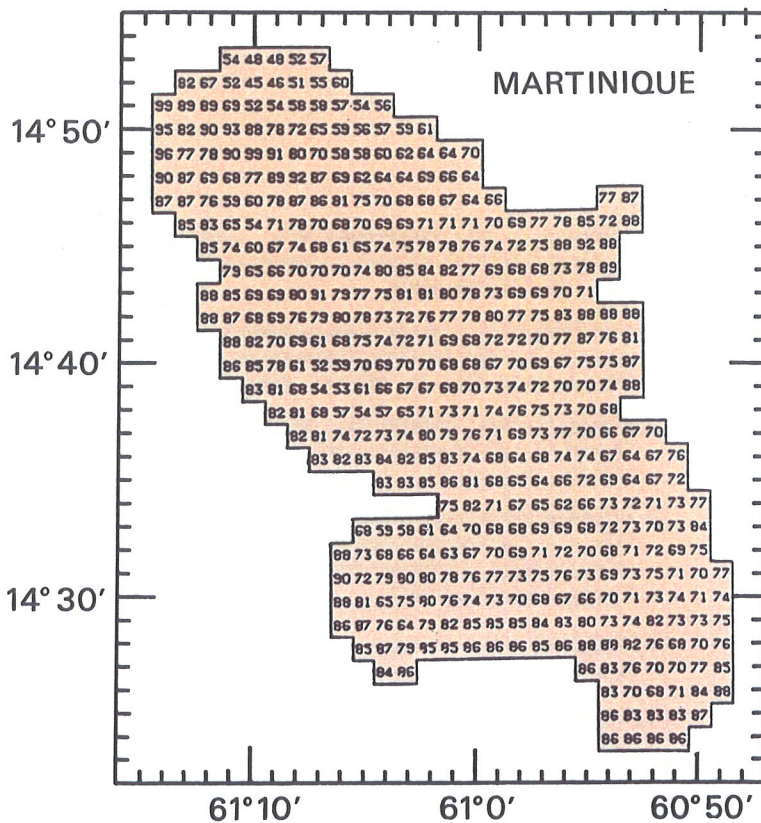
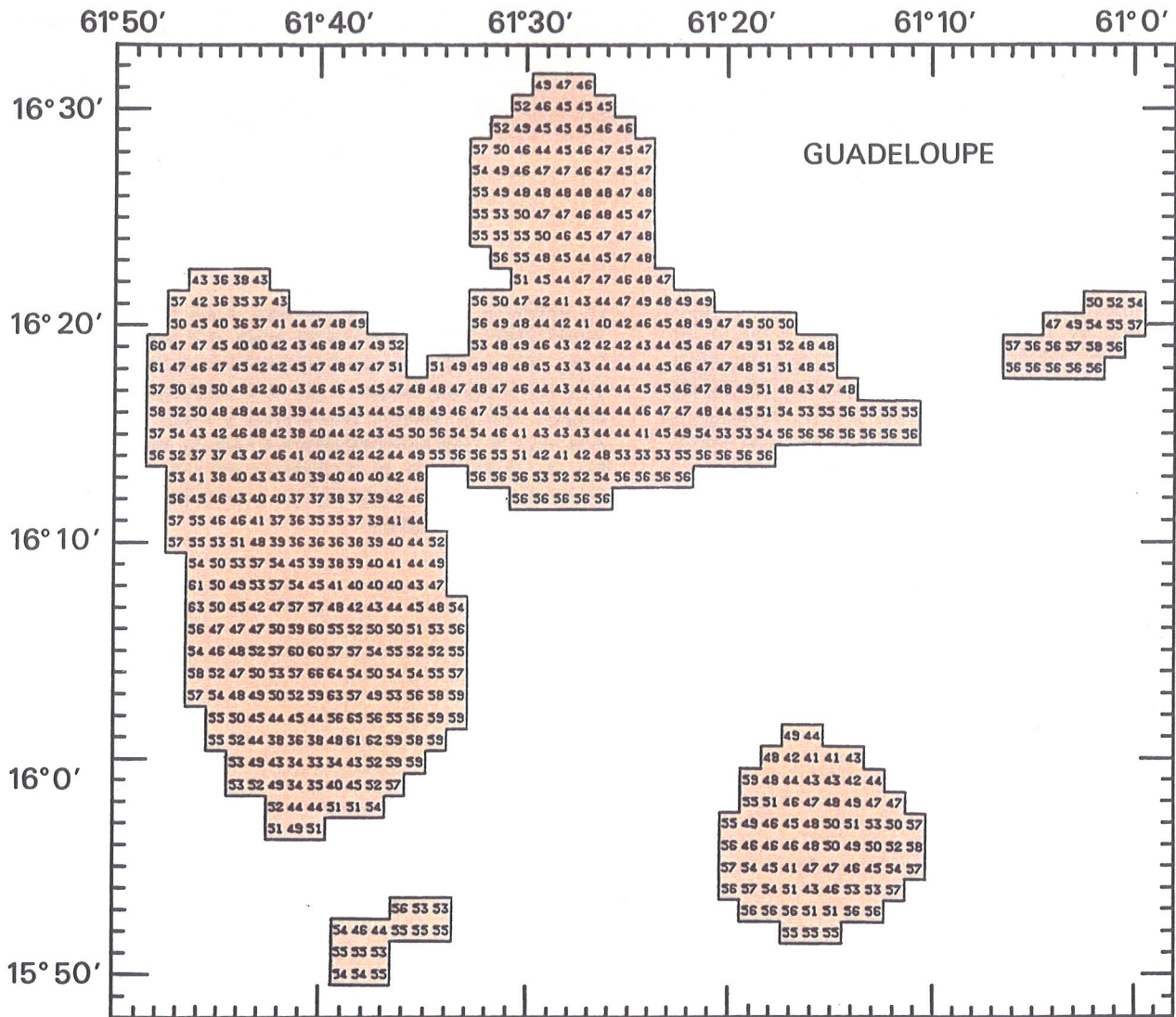


Figure 14 Vitesse moyenne du vent à 60 m de hauteur pour le secteur 5 (SSW, directions 170° - 210°)

Les cartographies présentées donnent, avec une résolution d'environ 2 km, les caractéristiques du vent à 60 m de hauteur : moyenne, distribution en fréquences, énergie. Elles permettent donc de mettre en évidence très rapidement les zones les plus favorables du point de vue de l'application envisagée. On peut noter par exemple que, sur une même île, la vitesse moyenne du vent peut varier d'un facteur 2.

De plus, une méthode est proposée pour estimer les caractéristiques du vent à une hauteur inférieure lorsque le site est peu complexe. Ce type de cartes peut donc être d'une grande utilité dans la conception de tout projet incluant le paramètre vent.

La précision des valeurs fournies a pu être évaluée par comparaison avec les mesures faites aux stations automatiques : on peut estimer généralement à environ 10 % l'incertitude sur la vitesse moyenne du vent, excepté pour les zones situées, soit en altitude (supérieure à 1000 m), soit sur la côte sous le vent immédiatement à l'est du relief, soit sur les îles de St-Martin et St-Barthélemy où l'on ne dispose de mesures qu'en une seule station. L'incertitude est évaluée à 20 % dans ces régions.

bibliographie

- 1 GANDEMER J., « Ventilation naturelle des habitations sous climat tropical humide. Approche aérodynamique », CSTB EN-ADYM 83.26 L, 1985.
- 2 SACRÉ C., « Le confort dans les espaces extérieurs : analyse microclimatique », Rapport CSTB EN-CLI 83.5 R, 1983.
- 3 DUCHÊNE-MARULLAZ Ph. et SACRÉ C., « Guide d'implantation des petites éoliennes », CSTB EN-CLI 84.4 L, 1984.
- 4 DELAUNAY D., « Cartographie régionale de l'énergie éolienne - Application à la Bretagne », CSTB EN-CLI 84.20 L, 1984.
- 5 DELAUNAY D. et SACRÉ C., « Cartographie du potentiel éolien en zone montagneuse - Application à la Corse », CSTB EN-CLI 85.2 R, 1985.
- 6 DELAUNAY D., « Cartographie des caractéristiques du vent en Martinique et en Guadeloupe », Rapport CSTB EN-CLI 86.10 R, 1986.
- 7 WIERINGA J., « Roughness-dependent geographical interpolation or surface wind speed averages », *Quart. J.R Met. Soc.* 112, 867-889, 1986.
- 8 PETERSEN E., « A note on a paper by J. Wieringa : Roughness-dependent geographical interpolation or surface wind speed averages », Riso National Laboratory, Int. Rep. I-214, 1985.
- 9 FIEDLER H. and PANOFSKY H.A., « The geostrophic drag coefficient and the effective roughness length », *Quart. J. Met. Soc.*, 98, 213-220, 1972.
- 10 NOILHAN et al., « Étude expérimentale de la couche limite au-dessus d'un relief modéré proche d'une chaîne de montagne », *Bound. Layer Met.* 24, 395-414, 1982.
- 11 ENDLICH IRM., LUDWIG F.L., BHUMRAKAR C.M. et ESTOQUE M.A., « A diagnostic model for estimating winds at potential sites for wind turbines », *J. Appl. Meteorol* 21, 1441-1445, 1982.
- 12 BHUMRAKAR C.M., MANCOSO F.L., LUDWIG F.L., RENNE D.S., « A practical and economic method for estimating wind characteristics at potential wind energy conversion sites » *Solar Energy* 25, 55-65, 1980.
- 13 SHERMAN C.S., « A mass consistent model for wind fields over complex terrain », *J. Appl. Meteorol.* 17, 312-319, 1978.
- 14 PHILLIPS G.T., « A preliminary user's guide for the NOABL objective analysis code », Science applications Inc. La Jolle California 92038, 1979.
- 15 DELAUNAY D., « Vents extrêmes dus aux cyclones tropicaux dans les DOM-TOM », *Cahier du CSTB* 2078, livraison 269, mai 1986.

annexe
calcul des coefficients C_h , C_T , C_S (d'après référence 3)

1 correction de hauteur C_h

Dans le cas où il n'y a pas de changement de rugosité au vent du site, le coefficient C_{hi} est donné par :

$$C_{hi} = \frac{\ln(h/z_o)}{\ln(60/z_o)}$$

S'il y a un changement de rugosité à la distance X , il est alors nécessaire en premier lieu de déterminer la hauteur δ de la couche limite interne sur le site par :

$$\delta = 0,35 X^{0,8} z_o^{0,2}$$

où z_o est la plus grande des 2 rugosités z_{o1} et z_{o2} (cf. fig. A1) :

On a alors :

– si $\delta \geq 60$ m :

$$C_{hi} = \frac{\ln(h/z_{o2})}{\ln(60/z_{o2})}$$

– si $\delta \leq h$:

$$C_{hi} = \frac{\ln(h/z_{o1})}{\ln(60/z_{o1})}$$

et si $h < \delta < 60$ m :

$$C_{hi} = \frac{\ln(h/z_{o2})}{\ln(\delta/z_{o2})} \times \frac{\ln(\delta/z_{o1})}{\ln(60/z_{o1})}$$

Nota : Les rugosités z_o , z_{o1} , z_{o2} sont déterminées en fonction des caractéristiques du terrain jusqu'à 5 km au vent du site, d'après les données du tableau 1.

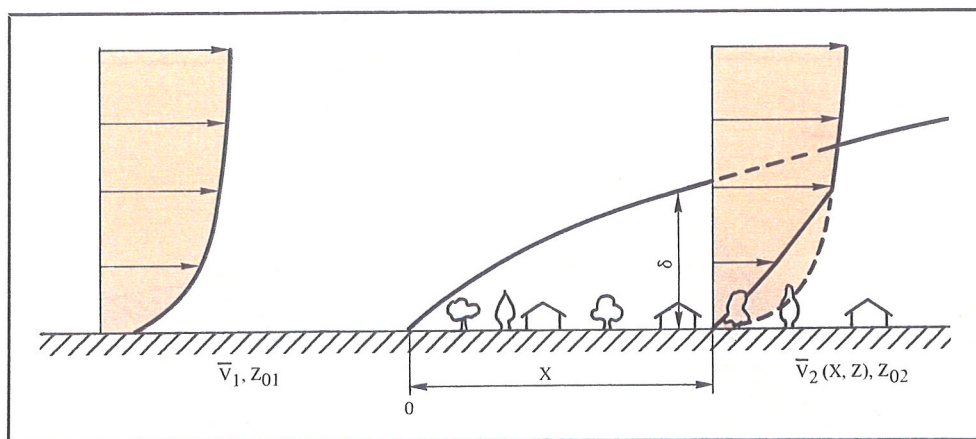


Figure A1 Changement de rugosité

2 correction de topographie C_T

Dans le cas d'une colline isolée ou d'un plateau défini par les paramètres suivants :

H_1 hauteur différentielle de la colline sur le versant au vent
 H_2 hauteur différentielle de la colline sur le versant sous le vent

L_1 demi-extension au vent de la colline

L_2 demi-extension sous le vent de la colline

X_t distance entre le site et le sommet de la colline ($X_t = 0$)
 (comptée positivement dans le sens du vent)

z_0 rugosité du site

Le coefficient de topographie C_T s'écrit :

$$C_T = 1 - 0,5 \left(\frac{H_1 + H_2}{L_1 + L_2} \right) \left(1 - 0,025 \ln \left(\frac{L_1}{z_0} \right) \right) \ln \left(\frac{Z}{L_1} \right) \cdot F(X_t)$$

avec les conditions suivantes :

si $H_2 > H_1$, on prend $H_2 = H_1$

si $\frac{H_1}{L_1} \geq \frac{1}{3}$, on prend $L_1 = 3 H_1$ (de même pour $\frac{H_2}{L_2}$)

L'expression $F(X_t)$ selon la position par rapport au sommet de la colline (X_t), prend les valeurs suivantes :

$$\text{si } -\frac{L_1}{2} \leq X_t \leq 0 : \quad F(X_t) = 1 + 2 \frac{X_t}{L_1}$$

$$\text{si } 0 \leq X_t \leq (H_1 + 9(H_1 - H_2)) :$$

$$F(X_t) = 1 - \frac{X_t}{(H_1 + 9(H_1 - H_2))}$$

dans les autres cas, $F(X_t) = 0$

Remarque

Dans le cas d'une très forte pente ($\frac{H_1}{L_1}$ ou $\frac{H_2}{L_2} \geq 1$) ou d'une falaise, on peut, en première approximation, utiliser la formulation précédente en dehors de la zone hachurée représentée sur la figure A3 :

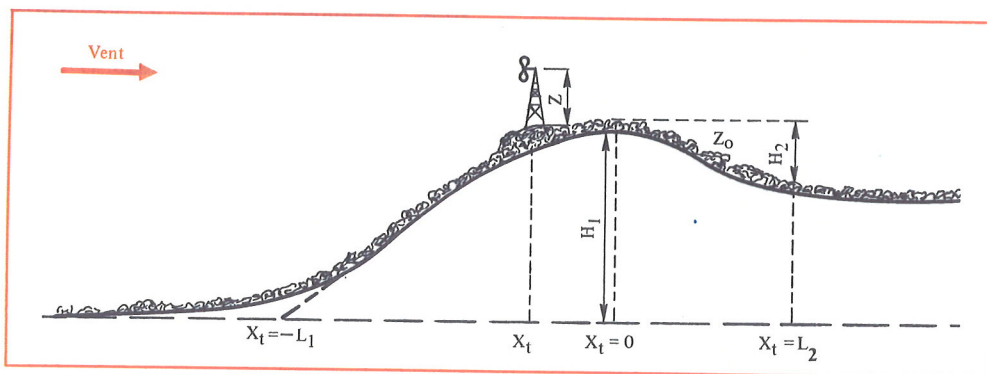


Figure A2 Paramètres relatifs à la topographie

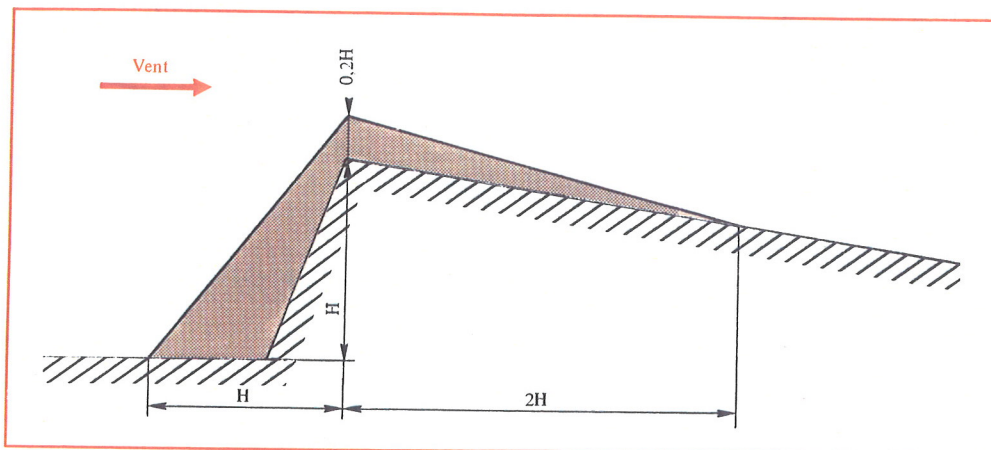


Figure A3 Zone où la formule de C_T ne s'applique pas

3 correction de sillage C_s

Lorsqu'un obstacle est situé au vent du site, à une distance inférieure à 25 fois la hauteur de l'obstacle, le coefficient de sillage est différent de 1 et peut être déterminé à l'aide des tableaux A1 et A2.

L'obstacle est défini par :

h : hauteur de l'obstacle

d : extension latérale (pour un bâtiment)

X : distance entre le site et l'obstacle

P : porosité de l'obstacle (pour une haie).

La porosité d'une haie varie de 20 %, pour une haie très dense, à 70 % pour une haie sans feuillage.

Tableau A1 Coefficient C_s sous le vent d'un bâtiment de hauteur h et d'extension latérale d

d/h	X/h = 5			X/h = 10			X/h = 20		
	z/h			z/h			z/h		
	0,5	1	2	0,5	1	2	0,5	1	2
≥ 9	?	0,45	0,90	?	0,60	0,78	0,85	0,85	0,85
5	?	0,90	1,0	0,65	0,70	0,90	0,88	0,88	0,90
2,5	0,65	0,70	0,90	0,88	0,88	0,90	1	1	1
1	0,90	0,90	0,92	1	1	1	1	1	1

Tableau A2 Coefficient C_s sous le vent d'une haie de hauteur h et de porosité P

P (%)	X/h 5			X/h = 10			X/h = 20		
	z/h			z/h			z/h		
	0,5	1	2	0,5	1	2	0,5	1	2
30	0,36	0,65	1,06	0,60	0,70	0,98	0,80	0,90	1
50	0,55	0,75	1,04	0,65	0,75	0,98	0,85	0,95	1
70	0,68	0,85	1,02	0,76	0,90	1	0,90	0,95	1

