OFFICE NATIONAL DE LA METEOROLOGIE

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

ATLAS VENT DE L'ALGERIE

Rabah Hammouche

Atlas Vent de l'Algérie
Office National de la Météorologie
BP 153, Dar El Beida – Alger – Algérie
Tél 50 69 11 – 50 69 13
Télex 64356 DGMET
Télefax 56 03 56

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

Etude réalisée par Rabah Hammouche
Office National de la Météorologie
Département de la Recherche
Alger - Algérie.

Préface

La maitrise des technologies mises en oeuvre par les machines permettant la conversion et l'exploitation de l'énergie éolienne devient impérieuse face à la dégradation abusive de l'environnement par une combustion exagérée d'hydrocarbures et les rejets thermiques de plus en plus croissant engendrées par une multiplication effreinée de machines thermodynamiques conventionnelles.

Le lancement de programmes de Recherche et Développement pour une diversification des sources d'énergie permettant de mettre à contribution de nouvelles sources d'énergie non polluantes devient la préoccupation dominante dans les politiques énergétiques nationales de l'avenir.

Dans les sites favorablement ventés non encore raccordés au réseau classique de distribution, l'énergie éolienne est sans nul doute sans compétition aucune par rapport aux autres sources d'énergie traditionnelles. Cependant, le fonctionnement optimal des machines reste conditionné par une connaissance approfondie du gisement éolien et de ses principales caractéristiques.

Cette étude qui développe les caractéristiques du vent en Algérie s'inscrit dans le cadre du programme global de recherche de l'Office National de la Météorologie et doit permettre à moyen terme d'évaluer le potentiel éolien existant en Algérie. Elle avait été initié dés 1985 sur demande du Commissariat aux énergies Nouvelles dans le cadre d'une collaboration avec le Laboratoire National de Risø du Danemark dans le but de tester sur nos régions le comportement des différents modèles théoriques développés et appliqués avec succés en Europe.

L'objectif de cette première étude est la détermination des caractéristiques climatologiques et statistiques du vent en Algérie en utilisant les données météorologiques du réseau d'observation de l'Office National de la Météorologie. Pour cela une méthodologie de traitement automatique des données climatologiques a été mis au point en faisant intervenir les théories de la couche limite atmosphérique. Cette étude repose sur l'utilisation du logiciel WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program) qui a été mis au point par le Département de Météorologie et d'Energie Eolienne du Laboratoire National de Risø dans le cadre de la réalisation de l'Atlas Eolien des pays de la Communauté Economique Européenne.

Une deuxième étude qui sera menée en étroite collaboration avec le Centre de Développement des énergies renouvelables du Haut Commissariat à la Recherche permettra l'évaluation du potentiel énergétique éolien sur les hauts plateaux en priorité puis au niveau national et à terme au niveau de tous les pays de l'Union du Maghreb Arabe.

Les relations qui sont instaurées entre l'Office National de la Météorologie et le Centre de Développement des Energies Renouvelables pour cette étude et pour en entreprendre une deuxième sur l'énergie éolienne doivent se renforcer et se développer davantage à l'avenir pour prendre en charge d'autres préoccupations de recherche et associer d'autres institutions scientifiques nationales et internationales.

Dr. Hadj Slimane Cherif
Ministre Délégué à la Recherche
et à la Technologie

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

Atlas Vent de l'Algérie is a major outcome of the cooperation between l'Office National de la Météorologie, Algeria and Risø National Laboratory, Denmark. The cooperation was initiated in 1984 with the intervention of the World Meteorological Organization and it is an example of a successful conveyance of knowledge and methodologies developed in a European Community research programme.

It is our hope that this publication will act as a paradigm for other wind atlases to come, which essentially means to adopt the text and layout from the European Wind Atlas and use the Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP) for data analysis and wind atlas calculations. The transnational nature of meteorology and climatology justifies the hope for a common format for wind atlases.

A common format is convenient for the user and allows the methodologies most efficiently be adapted by researchers to specific and extreme climates.

The climate of Sahara is obviously of a nature not thoroughly dealt with in the European Wind Atlas. The methods used were tested against data from climate zones spanning from Finland in the north to Greece in the south. The same methods without modification have been used for this atlas. The data base currently available could not provide the information necessary for modifications of the methodology to Algerian conditions. However, it is foreseen that the atlas may later be supplemented with more data sets which may lead to better methods for wind atlas calculations in Algeria and other countries in similar climatological settings.

It is our hope that the Atlas Vent de l'Algérie, containing statistics of the wind climate for all regions of Algeria, based on carefully selected and analyzed data sets and models developed on the best of contemporary theories, will provide an authoritative although inevitably incomplete basis for calculating the wind resources of Algeria.

It is with great pleasure that we acknowledge the excellent and inspiring cooperation with our colleagues in Algeria, in particular Rabah Hammouche.

Erik Lundtang Petersen
Head of the Meteorology and Wind Energy Department
Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark

Coordinator of the European Community Project:
The European Wind Atlas

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

Remerciements

Je saisi cette occasion pour exprimer mes plus vifs remerciements au Directeur générale de l'Office National de la Météorologie qui n'a ménagé aucun effort pour encourager la publication de cette étude. Je tiens á remercier monsieur Kirouane Abdelmalek, Directeur du Département de Recherche de l'ONM pour son appréciable contribution lors de la préparation du manuscrit.

Je voudrais également associer à ces remerciements ceux dont je ne puis énumerer les noms qui m'ont permis de preparer les fichiers de données météorologiques; parmi eux les personnels du Centre de Climatologie National ainsi que les personnels de la Region Météorologique Ouest.

J'exprime toute ma gratitude á l'ensemble des collégues du Département de Météorologie et d'Energie Eolienne du Laboratoire National de Risø, en particulier à Erik Lundtang Petersen, Ib Troen et Niels Gylling Mortensen pour avoir bien voulu m'accueillir au sein de leur groupe de recherche et aussi pour la mise á ma disposition de tous les moyens utiles à la réalisation de cette publication.

Je tiens à remercier également ici tous les collégues de l'Office National de la Météorologie qui ont contribués de prés ou de loin à la réalisation de cet Atlas Vent, en particulier les agents, les techniciens et les ingénieurs chargés d'effectuer l'observation météorologique, la collecte, la saisie et le contrôle des données météorologiques.

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

Résumé

L'Atlas Vent de l'Algérie constitue la première partie d'une étude destinée à l'évaluation du potentiel énergétique éolien disponible sur l'ensemble du territoire national. Cet Atlas contient les résultats statistiques du vent de trente sept stations météorologiques appartenant au réseau principal d'observation de l'Office National de la Météorologie. Les informations présentées dans ce document permettront d'identifier clairement dans une deuxième partie l'existence des régions potentiellement interessantes en matière d'énergie éolienne. Cette étude a été réalisée en utilisant la même méthodologie qui a été adoptée et appliquée avec beaucoups de succés dans le cadre de la mise en oeuvre de l'Atlas Eolien Européen. Cette réalisation a été effectuée grace à l'utilisation d'un modèle intitulé WASP.[1]

La partie théorique qui a servie à la mise au point des différents modèles utilisés pour la réalisation de cette étude est décrite de façon détaillée dans ce document. Il faut signaler cependant que pour une meilleure compréhension de tous les aspects théoriques et experimentaux, il est nécessaire que le lecteur ait des connaissances en Météorologie et en Statistique. Afin de permettre au lecteur d'apprécier cette réalisation, un bref descriptif du contenu de tous les chapitres qui constituent ce document est donné ci-aprés.

Une première partie du modèle utilisé consiste à prendre en considération les effets sur la vitesse du vent causés par les changements de rugosité de la surface du terrain situé en amont de l'anémomètre. Le principe général repose sur le calcul de la hauteur de la couche limite interne qui se developpe sous le vent de la discontinuité de la rugosité. Le profil vertical de la vitesse du vent au point considéré est recalculé en utilisant un profil logarithmique suivant trois niveaux. Les discontinuités de la rugosité du sol sont déterminées à partir des descriptifs de l'environnement immédiat des stations météorologiques retenues.

Une deuxième partie du modèle permet de tenir compte de l'influence des obstacles situés autour du capteur anémomètrique de la station. Cette influence est déterminée comme étant une décroissance relative de la vitesse du vent causée par un obstacle en considérant respectivement la hauteur de l'anémomètre ainsi que celle de l'obstacle, la longueur et la porosité de l'obstacle. Des facteurs de réduction de la vitesse du vent sont calculés en fonctions de tous ces paramètres.

Une troisème partie du modèle consiste à prendre en compte l'influence sur la vitesse du vent de la stratification thermique des basses couches de l'atmosphère. Cette influence, considérée dans cette étude comme étant un écart par rapport au profil logarithmique, est basée sur l'utilisation des lois de similitude de la couche limite de surface. Ces lois de similitude permettent de représenter le profil de la vitesse du vent suivant une forme logarithmique plus une fonction dépendante d'un paramètre de la stabilité atmosphérique. La prise en compte de la stabilité est basée

[1]WASP abréviation de Wind Atlas Analysis and Application Program se rapporte à un logiciel integré developpé en 1987 sur micro-calculateur du type PC par Ib Troen, Erik Lundtang Petersen et Niels Gylling Mortensen du Département de Météorologie et d'Energie Eolienne du Laboratoire National de Risø au Danemark.

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

également sur l'application de la loi de résistance géostrophique qui donne le vent géostrophique en fonction de la vitesse de frottement. Le flux de chaleur sensible intervient dans les calculs sous forme de moyennes arithmétique et quadratique selon que l'on est situé au dessus d'une surface continentale ou au dessus d'un plan d'eau.

Une quatrième partie de ce modèle se rapporte au calcul des modifications que subit l'écoulement de l'air au passage des obstacles topographiques. Cet effet consiste à calculer essentiellement le coefficient de survitesse pour des collines ou des crêtes ayants des pentes relativement douces. Dans le cas des stations météorologiques où le relief local influence dans une large proportion les mesures de la vitesse et de la direction du vent, les modifications de l'écoulement sont calculées à l'aide d'un modèle numèrique orographique trés performant. Ce modèle à haute résolution a été developpé et mis au point par le Laboratoire National de Risø en 1989. Il utilise une grille avec une représentation en coordonnées polaires et des dimensions de mailles radiales variables. Pour cela, le relief situé autour de 12 stations a été digitalisé et utilisé sous forme de contours topographiques.

L'ensemble des effets sur la vitesse du vent cités ci-dessus permettent de calculer des coefficients de correction que l'on applique aux distributions des vitesses de vent observé. Ces distributions de vent sont ainsi corrigées de toutes ces influences pour reconstituer ensuite la climatologie régionale du vent. Cette climatologie représentative à l'échelle régionale est présentée sous forme de tableaux statistiques donnant les valeurs des paramètres A et k de la distribution de Weibull pour huit secteurs de direction, pour cinq différentes hauteurs au dessus du sol (10, 25, 50, 100 et 200 mètres) et pour quatre classes de rugosité standard. Cette climatologie régionale est complétée par un ensemble de tableaux statistiques portant sur les données de mesures de la vitesse et de la direction du vent. On donne également pour chaque station, l'empreinte climatologique représentée par cinq graphes comportant beaucoup d'information sous une forme relativement compactée.

Une liste exhaustive des principaux ouvrages et références qui ont servi à la réalisation de WASP et à la la préparation de cette publication est présenté dans le dernier chapitre de ce document.

L'annexe A donne la liste de tous les symboles et les abréviations utilisés dans ce document tandis que *l'annexe B* décrit les critères de sélection des stations météorologiques utilisées dans cette étude.

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

Table des matières

Préface 5

Remerciements 7

Résumé 8

1 Introduction 13
- 1.1 Principe général . . . 13
- 1.2 Classification de la rugosité . . . 14
- 1.3 Les effets d'obstacles . . . 17
- 1.4 Influence de la topographie locale . . . 18

2 Approche théorique 21
- 2.1 Définition du vent géostrophique . . . 21
- 2.2 Couche limite atmosphérique . . . 22
- 2.3 Lois de similitude de la C.L.S . . . 23
- 2.4 Lois de résistance géostrophique . . . 25
- 2.5 Influence de la stratification thermique . . . 26
- 2.6 Influence du changement de la rugosité . . . 29
- 2.7 Influence des obstacles . . . 31
- 2.8 Influence de l'Orographie locale . . . 32

3 Traitement statistique 35
- 3.1 Définition de la vitesse moyenne du vent. . . . 35
- 3.2 Loi de distribution statistique de Weibull . . . 36
- 3.3 Détermination des paramètres de Weibull . . . 37

4 Description des modèles d'analyse et d'application 39
- 4.1 Modèle d'analyse . . . 39
- 4.2 Modèle d'application . . . 41

5 Résultats 43
- 5.1 Identification de la Station . . . 43
- 5.2 Statistiques des données brutes . . . 44
- 5.3 Climatologie régionale du vent . . . 44
- 5.4 Représentation Graphique . . . 45
- 5.5 Résultats . . . 47

6 Bibliographie 137

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

Annexe **141**

A Symboles et abréviations **141**
A.1 Définition des symboles utilisés 141
A.2 Liste des abbrévations 143

B Critères de sélection des stations **145**
B.1 Critéres de sélection des stations 145

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

Chapitre 1

Introduction

1.1 Principe général

Le but de l'Atlas Vent d'Algérie est d'établir les caractéristiques statistiques et climatologiques du vent en Algérie en vue de permettre une évaluation du potentiel énergétique éolien sur l'ensemble du territoire national. Compte tenu de l'existence d'une grande variété de sites et de conditions de mesures (instruments différents, hauteurs de mesures variables ... etc), il est souvent trés difficile et hasardeux d'effectuer des comparaisons directes des mesures de vent entre stations météorologiques. Aussi, l'objectif essentiel de cet Atlas Vent est de mettre à la disposition des utilisateurs des données statistiques cohérentes et fiables sur le vent en Algérie. Pour cela, on fait subir aux mesures de vent les corrections dûes aux effets de la variation de la rugosité de surface, influence de la topographie, à l'influence des obstacles environnants la station et aux effets de la stratification thermique de l'atmosphére). Les méthodes de corrections utilisées dans cette étude sont décrites en détails dans les chapitres 2 et 4.

La mesure de la vitesse du vent dans une station météorologique est caractérisée essentiellement par deux facteurs importants. Il s'agit d'une part des systèmes météorologiques à l'échelle synoptique dont les dimensions sont de l'ordre de plusieurs centaines de kilométres et d'autre part du rôle que joue la topographie locale environnante sur un rayon de l'ordre d'une dizaine de kilomètres.

Il est admis également que les résultats obtenus directement à partir des vitesses et des directions du vent ne sont représentatifs que de l'endroit où les mesures ont été réalisées. L'application des statistiques de vent au calcul du potentiel énergétique éolien dans une région donnée nécessite l'utilisation de méthodes qui permettent d'extrapoler ces statistiques à l'endroit désiré à partir de la station météorologique. Le développement de ces méthodes a donné naissance à des modéles relativement sophistiqués qui permettent d'extrapoler horizontalement ou verticalement les données de vent et de pouvoir évaluer ainsi les ressources énergétiques éoliennes. Ces modéles sont pour la plupart basés sur les théories de l'écoulement de l'air dans

les basses couches de l'atmosphère et tiennent compte à la fois de l'influence de la surface terrestre, des effets dûes à la présence d'obstacles autour de l'anémomètre et des modifications de la structure du vent imposées par la variation de la topographie locale du terrain. La figure 1.1 illustre bien le principe d'utilisation de ces différents modéles pour déterminer la climatologie régionale du vent à partir des mesures. La procédure inverse consiste à reconstituer les statistiques du vent en un point quelconque à partir de cette climatologie régionale.

37 stations météorologiques du réseau d'observation synoptique de l'Office National de la Météorologie ont été choisies pour calculer les climatologies régionales du vent (les critères de sélection des stations sont décrits en annexe B). La liste des stations utilisées est donnée dans la table 7.1. Afin de permettre au lecteur de mieux apprécier la complexité du problème posé, on décrit briévement dans les paragraphes ci-dessous le principe général de la prise en compte des divers élements tels que la rugosité, la présence des obstacles et l'influence de la topographie locale.

1.2 Classification de la rugosité

La rugosité de la surface d'un terrain donné est déterminée par la taille et la distribution des divers éléments rugeux qu'elle contient. Pour des régions continentales, ces élements rugeux correspondent généralement à de la végétation (herbe rase, arbres, forêts) et à des zones urbaines ou industrielles. Dans cet Atlas Vent les différents types de terrain en été classés en quatre catégories standard dont chacune est caractérisée par la nature de ses élements rugeux. Chaque catégorie est définie par une classe de rugosité. La rugosité d'une surface est habituellement représentée par une échelle de longueur qu'on appelle *longueur de rugosité* que l'on note par z_0. Une définition simple de la longueur de rugosité a été donnée par Lettau (1969) et détaillée plus tard par Petersen et al. (1981), Duchêne-Marullaz et Sacré (1984) et Troen et Petersen (1989). Les longueurs de rugosité qui correspondent aux classes de rugosités adoptées dans cet Atlas sont définies comme suit:

1. Classe 0: plans d'eau ($z_0 = 0.0002$ m).
2. Classe 1: terrain plat et dégagé ou légèrement ondulé avec trés peu de brise-vents ($z_0 = 0.03$ m).
3. Classe 2: terrain agricole avec de nombreuses haies et arbres isolés. Le terrain est plat avec de faibles ondulations tels que les Sites d'aéroports ($z_0 = 0.1$ m).
4. Classe 3: région forestière, une banlieue avec quelques batiments isolés ou terrain agricole avec de nombreux brise-vents séparés entre eux de 100 métres environ ($z_0 = 0.4$ m).

La figure 1.2 donne la correspondance entre la longueur de rugosité, les caractéristiques du terrain et la classe de rugosité.

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

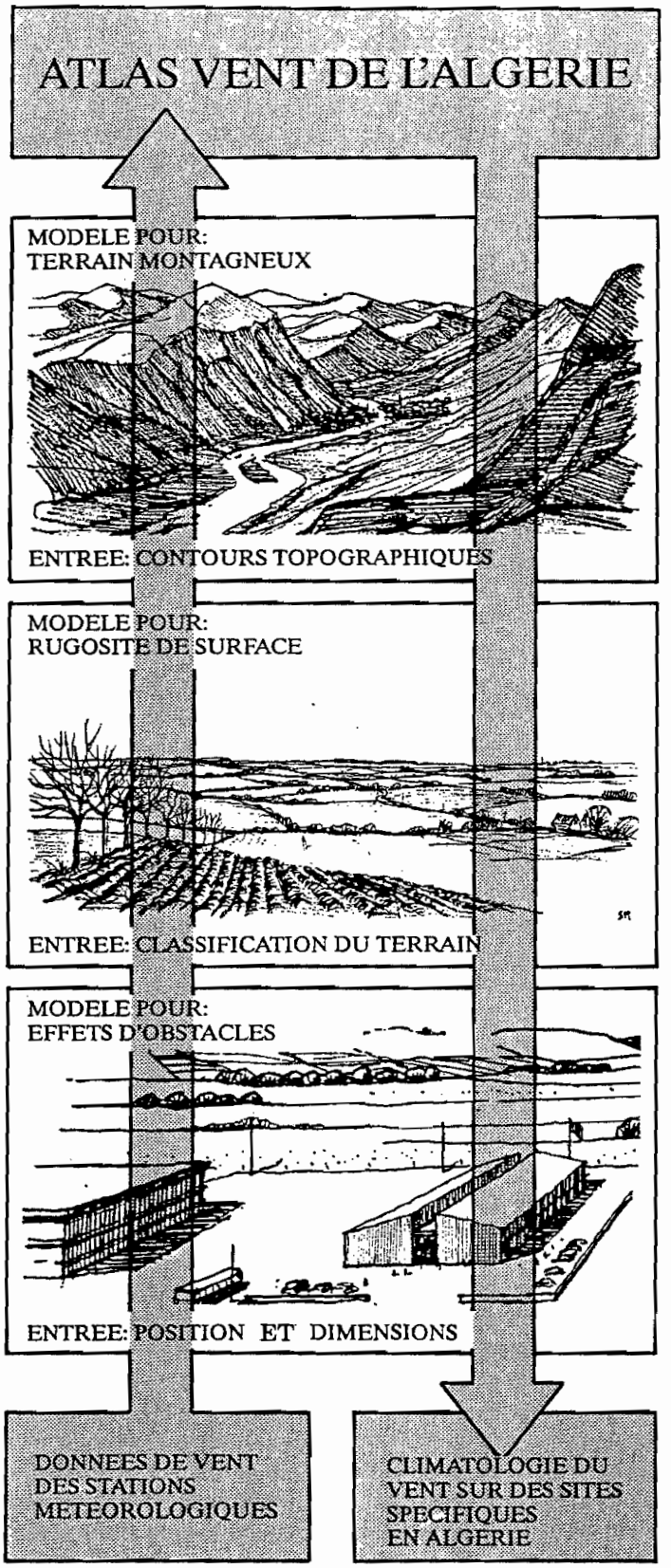

Figure 1.1: Méthodologie de l'Atlas Vent d'aprés Troen et Petersen (1989). Des modèles de calcul sont utilisés pour déterminer la climatologie régionale du vent à partir des mesures effectuées dans une station météorologique. La procédure inverse (application de l'Atlas Vent) consiste à reconstituer les statistiques du vent en un point quelconque non loin de la station météorologique à partir de la climatologie régionale.

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

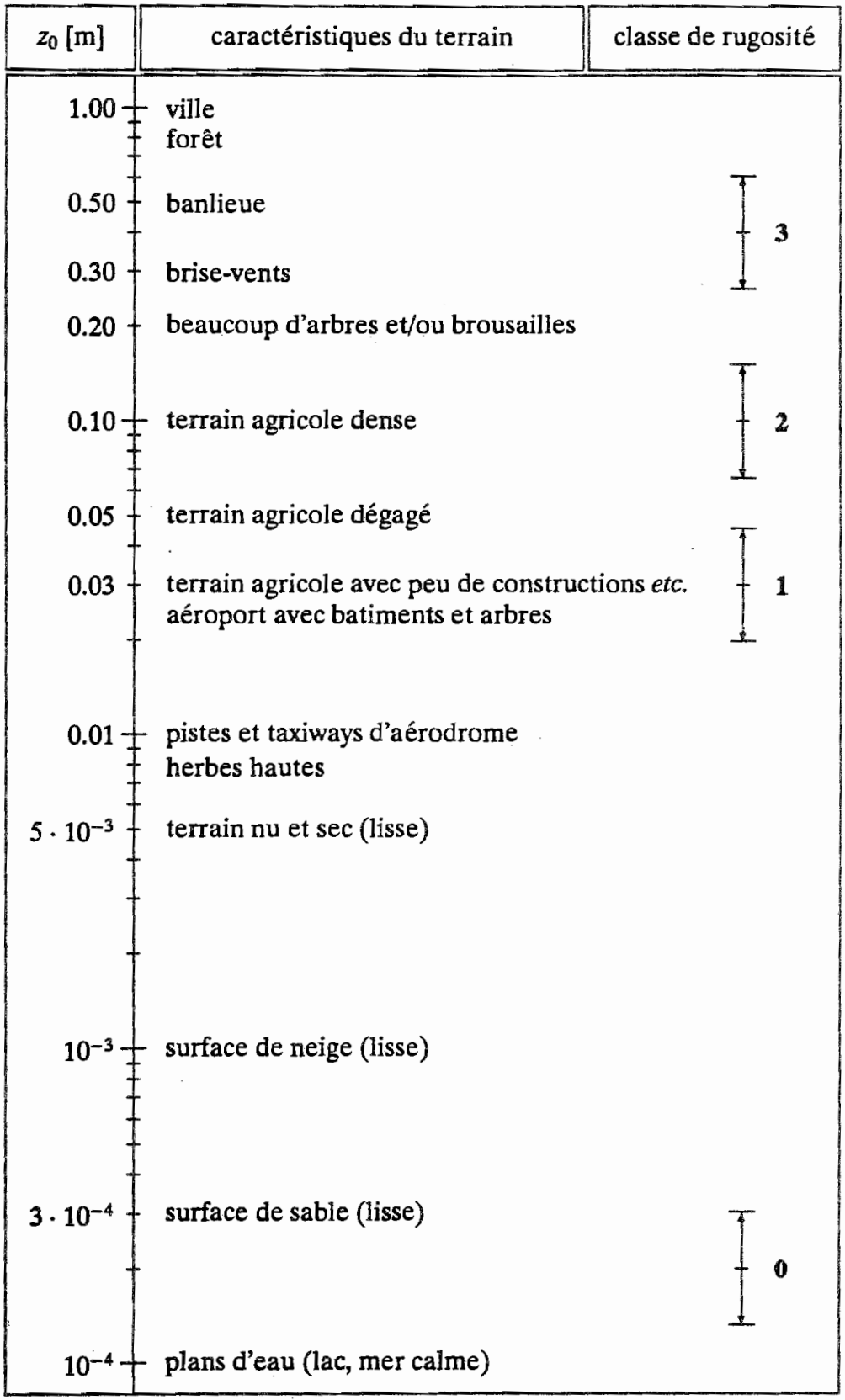

Figure 1.2: Correspondance entre la longueur de rugosité, les caractéristiques du terrain et les classes de rugosité. Les classes de rugosité sont délimitées par des fléches verticales. Le trait central au milieu de chaque classe indique la valeur standard de z_0. La longueur de la fléche verticale illustre la gamme de variation ainsi que le domaine d'incertitude pour l'attribution de z_0.

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

1.3 Les effets d'obstacles

L'effet d'obtacle étant défini comme une décroissance relative de la vitesse du vent causée par la présence d'un obstacle autour de l'anémomètre. Cet effet est fonction des paramètres suivants:

- Distance entre l'obstacle et le point de mesure (x)
- Hauteur de l'obstacle (h)
- Hauteur au dessus du sol de l'anémomètre (H)
- Longueur de l'obstacle (L)
- Porosité de l'obstacle (P)

La figure 1.3 donne le principe de la réduction de la vitesse du vent dûe à la présence d'un obstacle de longueur supposée infinie et de porosité égale à zéro. On constate que l'effet d'obstacle décroit lorsque la longueur de l'obstacle diminue et également lorsque la porosité augmente.

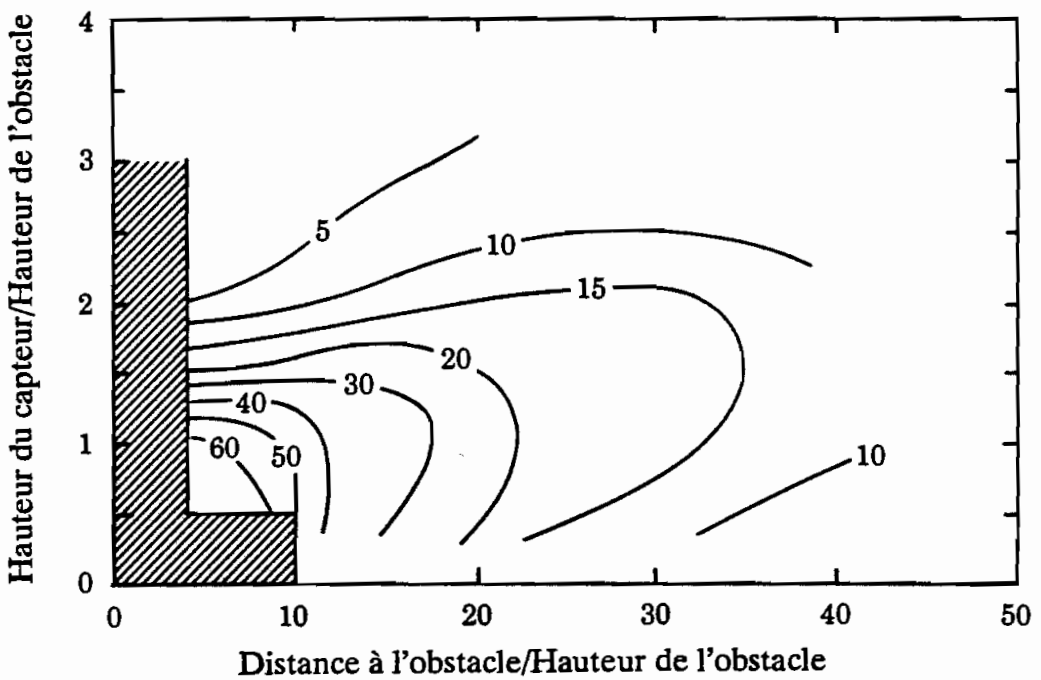

Figure 1.3: Facteur de réduction (R_1 exprimé en pour cent) de la vitesse du vent par un obstacle à deux dimensions d'aprés les expressions proposées par Perera (1981). Dans la zone hachurée, l'effet d'obstacle est trés lié aux détails de la géométrie de l'obstacle en question.

En générale, la porosité est approximativement égale à zéro pour des constructions et 0.5 pour des obstacles formés d'arbres. La table 1.1 donne quelques valeurs caractéristiques de la porosité pour différentes catégories d'obstacles. La porosité des

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

arbres peut également varier au cours de l'année avec le changement des saisons et des conditions climatiques . Pour cela la porosité doit être considérée ici comme un paramètre climatologique moyen de manière à tenir compte globalement de la variation des obstacles.

Tableau 1.1: porosité des obstacles

Apparance	Porosité P
Fermée	0
Trés dense	≤ 0.35
Dense	$0.35 - 0.50$
Dégagée	≥ 0.50

L'effet de la porosité P ($0 \leq P \leq 1$) sur la vitesse du vent est pris en compte comme un paramètre multiplicatif en $1 - P$.

L'autre élément important qui se rapporte à la correction des données de vent est la longueur L de l'obstacle. Dans un secteur donné de 30 deg le facteur de réduction R_2 est obtenue en utilisant les expressions suivantes:

$$R_2 = \begin{cases} \left(1 + 0.2\frac{x}{L}\right)^{-1} & \text{pour } \frac{L}{x} \geq 0.3 \\ 2\frac{L}{x} & \text{pour } \frac{L}{x} \leq 0.3 \end{cases} \tag{1.1}$$

d'où

$$u_{cor} = u \cdot (1 - R_2 \cdot R_1(1 - P)) \tag{1.2}$$

u_{cor} et u sont les vitesses moyennes du vent qui correspondent respectivement aux conditions avec effet et sans effet d'obstacle.

1.4 Influence de la topographie locale

Les effets décrits dans le paragraphe précédent concernent essentiellement les terrains plats et homogénes. Au passage des obstacles topographiques, l'écoulement de l'air subit des modifications qui peuvent engendrer des augmentations de la vitesse du vent au sommet des collines. Plusieurs expériences intensives de mesures ont éte réalisées par la communauté scientifique internationale. A titre d'exemple on peut citer l'expérience d'Askervein (Taylor et Teunissen, 1987; Salmon et al., 1987).

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

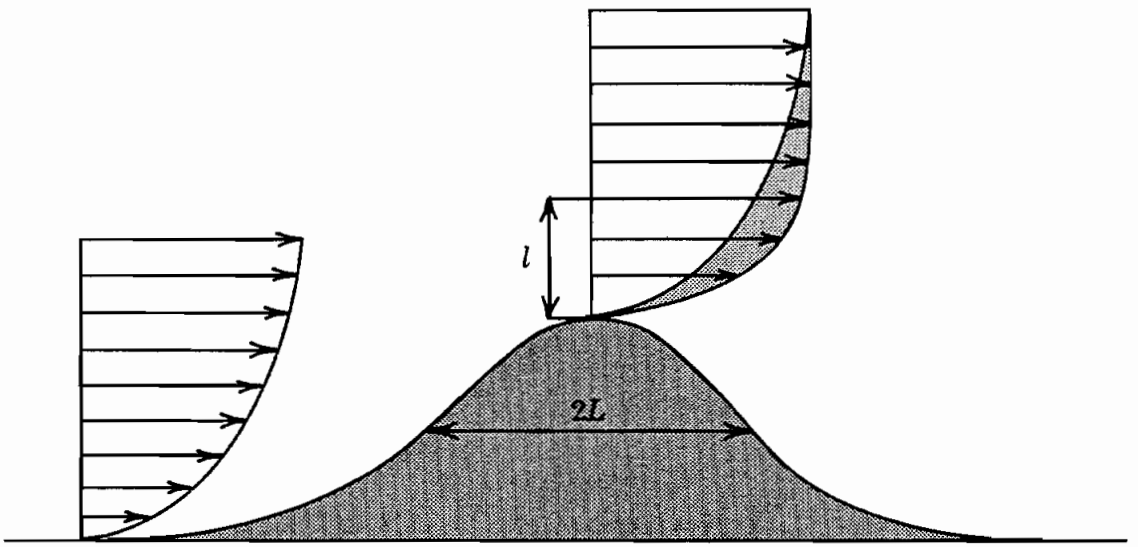

Figure 1.4: Ecoulement au dessus d'une colline idéale avec une représentation du profil de la vitesse au bas et au sommet de la colline. Les deux échelles de longueur caractéristiques: L désigne la distance du sommet au point au vent où la hauteur de la colline a diminué de moitié; ℓ est la hauteur à laquelle le maximum de vitesse est atteint

Si u_2 et u_1 représentent respectivement, à la même hauteur au dessus du sol, les vitesses du vent au sommet et au bas d'une colline idéale (forme douce et simple) telle qu'elle est illustrée par la figure 1.4, le coefficient de survitesse ΔS est défini comme:

$$\Delta S = \frac{u_2 - u_1}{u_1} \tag{1.3}$$

On constate d'aprés la figure que le profil vertical du vent au bas de la colline est logarithmique tandis qu'au sommet de la colline il subit des modifications importantes avec un maximum obtenu à une hauteur l. Au dessus de l, le profil est pratiquement constant jusqu'à une hauteur égale $2L$ où L désigne la longueur caractèristique de la colline. Les paramétres ΔS et l sont calculés en utilisant les formules proposées par Jensen et al. (1984).

$$\Delta S \simeq 2\frac{h}{L} \tag{1.4}$$

$$\ell \simeq 0.3 \cdot z_0 \left(\frac{L}{z_0}\right)^{0.67} \tag{1.5}$$

Ces expressions sont généralement valables pour des collines dont la dimension (perpendiculaire à la direction du vent) est beaucoup plus grande que L de manière à considérer le probléme seulement sous sa forme bi-dimensionnelle.

BIBLIOTHEQUE DU CERIST