PolyPublie
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Title:	Aspects économiques de l'énergie éolienne
Auteurs: Authors:	Ricardo Camarero
Date:	1979
Type:	Rapport / Report
Référence: Citation:	Camarero, R. (1979). Aspects économiques de l'énergie éolienne. (Rapport technique n° EP-R-79-07). https://publications.polymtl.ca/5963/

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: PolyPublie URL:	https://publications.polymtl.ca/5963/
Version:	Version officielle de l'éditeur / Published version
Conditions d'utilisation: Terms of Use:	Tous droits réservés / All rights reserved

Document publié chez l'éditeur officiel
Document issued by the official publisher

Institution:	École Polytechnique de Montréal
Numéro de rapport: Report number:	EP-R-79-07
URL officiel: Official URL:	
Mention légale: Legal notice:	

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

MATHÉMATIQUES

Rapport Technique EP79-R-7

Classification: Library of Congress no

ASPECTS ECONOMIQUES DE L'ENERGIE EOLIENNE

RICARDO CAMARERO

Février 1979

Ecole Polytechnique de Montréal

CA2PQ
UP4
79R07
FRE

Campus de l'Université
de Montréal
Case postale 6079
Succursale 'A'
Montréal, Québec
H3C 3A7

ECOLE POLYTECHNIQUE BIBLIOTHEQUE

27 FEV 1979

ASPECTS ECONOMIQUES DE L'ENERGIE EOLIENNE

par

RICARDO CAMARERO

Don

Département de Mathématiques
Ecole Polytechnique

À CONSULTER
SUR PLACE

Février 1979

RESUME

Dans ce rapport on compare le coût de l'unité de chaleur produite par une éolienne avec un système de dissipation directe et par une éolienne avec un système de pompe à chaleur. On utilise deux régimes de vent correspondant à la région de Sherbrooke et celle des Iles de la Madeleine.

Le contenu de ce rapport a été présenté comme conférence par l'auteur, R. Camarero, dans le cadre d'un cours intensif intitulé Machines Eoliennes, Theorie et applications, sous la responsabilité de MM. E. Bilgen et I. Parachivoiu, en mars 78 à l'Ecole Polytechnique de Montréal.

12. ASPECTS ECONOMIQUES DE L'ENERGIE EOLIENNE

12.1 *INTRODUCTION*

L'étude des questions économiques concernant l'utilisation de l'énergie éolienne pour fins de conversion en autre forme d'énergie consiste, à partir des données suivantes:

i. le potentiel éolien local
ii. les besoins énergétiques
iii. le système éolien choisi pour répondre aux exigences de i. et ii.

à calculer le prix de revient de l'énergie ainsi produite. Il est bien évident que la rentabilité d'une installation est relative et dépend en outre de *la disponibilité de l'énergie éolienne*. Une même installation située en deux endroits différents peut donner, selon la moyenne locale des vitesses de vent et de la distribution de la fréquence des vitesses, deux prix de revient du kW très différents.

Par ailleurs, *l'évaluation précise des besoins* constitue une étape qu'il faut faire avec beaucoup de soins, car ceux-ci affectent directement la puissance installée et par conséquent le prix de l'installation. Le calcul des besoins, ou très souvent la fraction de ceux-ci que l'on désire satisfaire, déterminera pour un endroit donné la rentabilité de l'ensemble.

Finalement *la nature du système choisi* répondant à certains critères plus ou moins exigeants quant à la fiabilité, le besoin d'entretien, robustesse et résistance aux efforts du vent, et l'incorporation d'un système de stockage et/ou d'appoint déterminera en dernier lieu le coût de l'installation.

Le but de ce chapitre est d'établir une approche pour évaluer la rentabilité de telles installations et de présenter deux exemples particuliers d'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité et de chaleur pour des fins domestiques. Deux localités ont été retenues pour fins de comparaisons: Sherbrooke et les Iles de la Madeleine représentant respectivement un mauvais et un bon site en ce qui concerne le régime des vents.

12.2 *EVALUATION DU POTENTIEL EOLIEN*

Généralités.- L'évaluation du potentiel éolien est la première étape d'une étude de faisabilité ou de rentabilité. L'approche peut aller d'une simple évaluation subjective basée sur les conditions atmosphériques jusqu'à l'utilisation de relevés météorologiques très précis et complets. Evidemment ces derniers ne sont pas toujours disponibles pour l'endroit envisagé et il faut alors entreprendre une étude dont l'envergure dépendra des moyens (équipements, main-d'oeuvre, fonds) disponibles, et du temps que l'on désire ou que l'on peut y consacrer.

Il est bien évident qu'on ne procédera pas avec les mêmes moyens que si l'investissement est relié à une installation domestique de quelques milliers de dollars (pour un chalet par exemple) que pour un barrage éolien d'un coût envisagé de plusieurs millions. Dans ce dernier cas, on procédera avec des relevés faits à l'endroit précis toutes les heures échelonnés sur une période d'une année, au moins. Entre ces deux cas extrêmes, il existe plusieurs solutions intermédiaires tant au niveau de la précision que des coûts.

On distingue deux possibilités:

i. *Le site est déjà fixé.* Ceci peut être le cas d'un usager qui désire subvenir à ses besoins énergétiques domestiques. Dès lors l'éolienne devra être montée sur sa propriété.

ii. *Le choix du site est libre.* Ceci peut être le cas d'un organisme para-public, tel que l'Hydro-Québec qui envisage la conversion d'énergie éolienne en énergie électrique, par exemple pour distribution à ses abonnés. Alors il y a un grand nombre de sites possibles qui devront se situer à une distance raisonnable de la concentration des utilisateurs.

Dans le premier cas des relevés de vitesses devront se faire à partir des données météorologiques existentes inscrites sur les cartes des vents que l'on obtient du Service de Météorologie local ou du Ministère des Transports. Ces cartes dont des exemple sont donnés à l'annexe B, donnent typiquement les courbes d'isovitesses. Ces valeurs représentent des moyennes annuelles basées sur des relevés à des stations météorologiques réparties de manière très distancée sur le territoire. Donc on obtient une répartition de courbes pas très fine qui oblige à une interpolation. Mais en général, ceci permet une assez bonne évaluation de l'énergie disponible et surtout permettra de prendre une décision quant à la viabilité d'un tel projet.

Une deuxième source d'information sur le potentiel éolien, serait de contacter l'aéroport le plus proche et finalement le prélèvement de lectures à l'aide d'un anémomètre. Le coût de tels instruments varie d'une dizaine à quelques centaines de dollars. Les valeurs à obtenir sont les suivantes:

i. *les vitesses en fonction du temps;*
ii. *les courbes vitesses-durée;*
iii. *la durée des périodes d'acalmie.*

De la première série de mesures on obtient une distribution qui peut être illustrée graphiquement comme montrée à la Figure 12.1

De ce diagramme on peut tirer le potentiel éolien brut, c'est-à-dire:

$$W = \frac{k}{T} \int_0^T V^3(t)\,dt \qquad (12.1)$$

où T est la période de temps sur laquelle les mesures ont duré, k est un facteur comprenant le rendement de Betz, (16/27), la masse volume de l'air et S = 1 unité de superficie:

$$K = \frac{16}{27} \frac{\rho}{2} \times 1 \qquad (12.2)$$

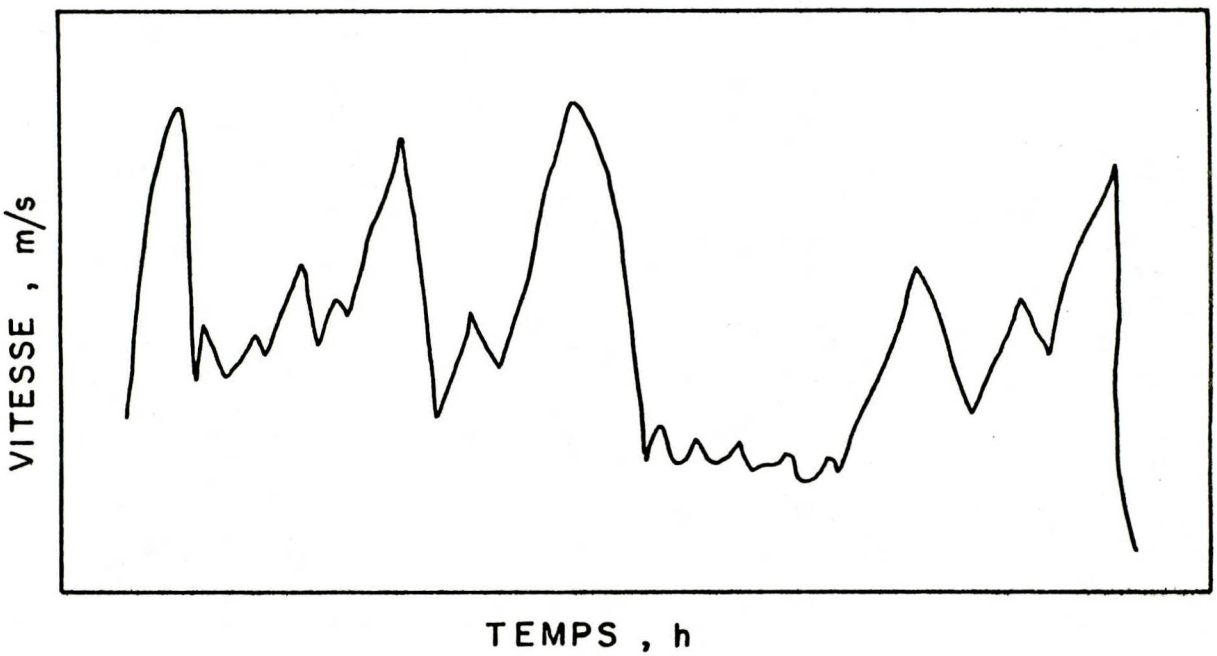

Figure 12.1 Relevé horaire de la vitesse du vent.

Le résultat de cette intégration s'exprime en kWh/m^2, et représente la quantité totale d'énergie qu'il est théoriquement possible d'extraire par unité de surface captée par une machine qui serait parfaite.

La seconde caractéristique d'un site éolien est *la courbe vitesse-durée* et représente la durée (exprimée en pourcentage du temps total des observations) pour laquelle le vent a soufflé avec une vitesse donnée. Cette courbe s'obtient à partir de la Figure 12.1, et possède en général l'aspect montré à la Figure 12.2.

Le but de cette courbe est d'obtenir la productibilité théorique de l'aérogénérateur, c'est-à-dire la fraction du temps que l'installation produit une puissance au moins égale à la puissance nominale. Plus le facteur de productibilité sera élevé plus la rentabilité sera élevée, car cela correspond à une plus grande utilisation de la capacité nominale de la machine.

En dernier lieu *la durée des périodes d'acalmie ainsi que leur fréquences*, détermineront la taille du système de stockage ou du système d'appoint et par conséquent le coût de cette partie de l'ensemble. Après le calcul de l'énergie disponible brute, il faut obtenir la valeur nette de l'énergie convertie. Cette énergie sera celle utilisable et dépendra des caractéristiques propres de l'éoliennes:

i. *vitesse du vent d'armorçage;*
ii. *vitesse du vent nominal;*
iii. *vitesse maximale du vent, admissible pour le fonctionnement de l'éolienne;*
iv. *rendement global.*

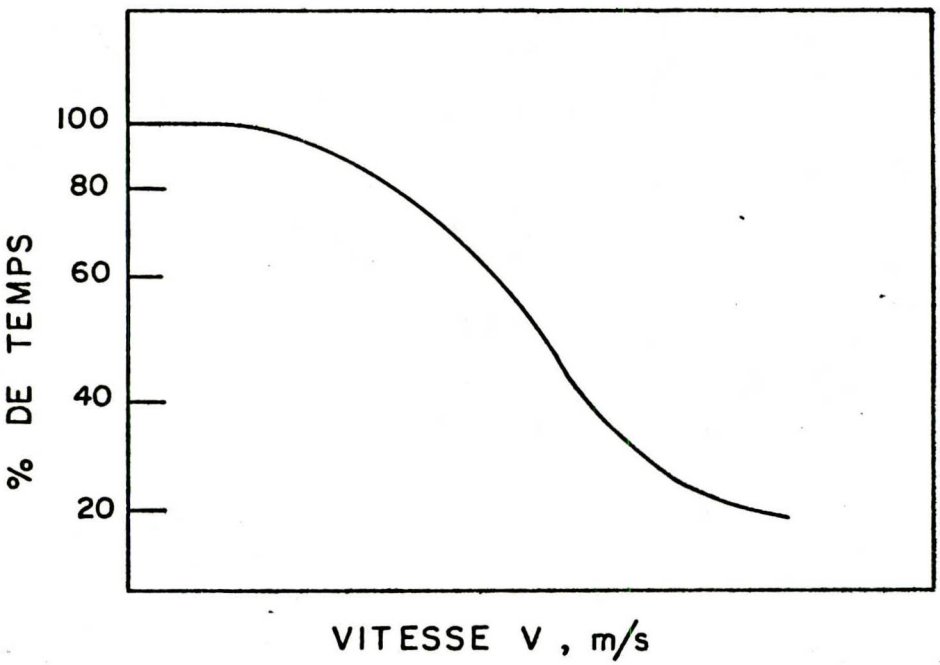

Figure 12.2 Courbe vitesse-durée.

Ces caractéristiques ont pour effets de retrancher des quantités d'énergie qui ne seront pas converties. La vitesse d'amorçage correspond à une puissance du vent équivalente à celle requise pour surmonter les forces d'inertie, et de friction de toutes sortes dans l'ensemble de l'installation. Donc, plus cette valeur sera élevée, plus on a une quantité d'énergie non convertie qu'il faut retrancher de l'énergie totale disponible. La répartition de l'énergie par m^2, par an, avec la vitesse du vent est donnée sur la Figure 12.3

La vitesse nominale est la vitesse du vent pour laquelle l'éolienne donne la puissance de design; au-dessus de cette valeur, pour des raisons de sécurité pour l'équipement d'hélice est freinée par un mécanisme régulateur quelconque. Etant donné la façon dont la puissance croît avec la vitesse, il est primordial pour la rentabilité du système d'établir ce point au niveau le plus élevé car chaque augmentation de vitesse augmente au cube la puissance convertie. Malheureusement on doit atteindre un compromis, également imposé par le contraintes d'odres économiques, car plus la vitesses nominale sera élevée, plus les composantes du système telles: la tour, les pales, les roulements, etc., devront être robustes, résultant en un coût accru.

L'effet de cette contrainte est illustré graphiquement à la Figure 12.4

Le rendement global est la fraction de l'énergie théoriquement disponible que le système convertit en énergie utile. Le facteur dépend du type d'éolienne (axe horizontal, axe vertical, nombre de pales, profile des pales) et de toutes les autres composantes mécaniques et électriques. Bien que dépendant de la vitesse on peut le considérer constant pour fins de calculs. L'effet sur la récupération d'énergie sera de multiplier la

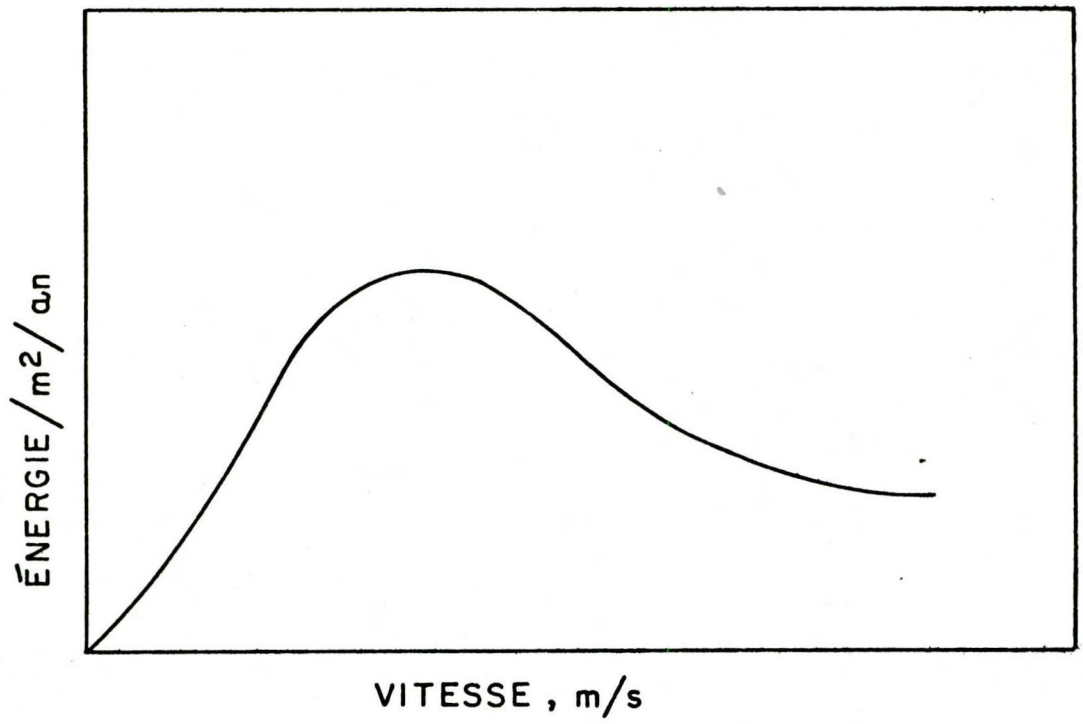

Figure 12.3 Répartition de l'énergie

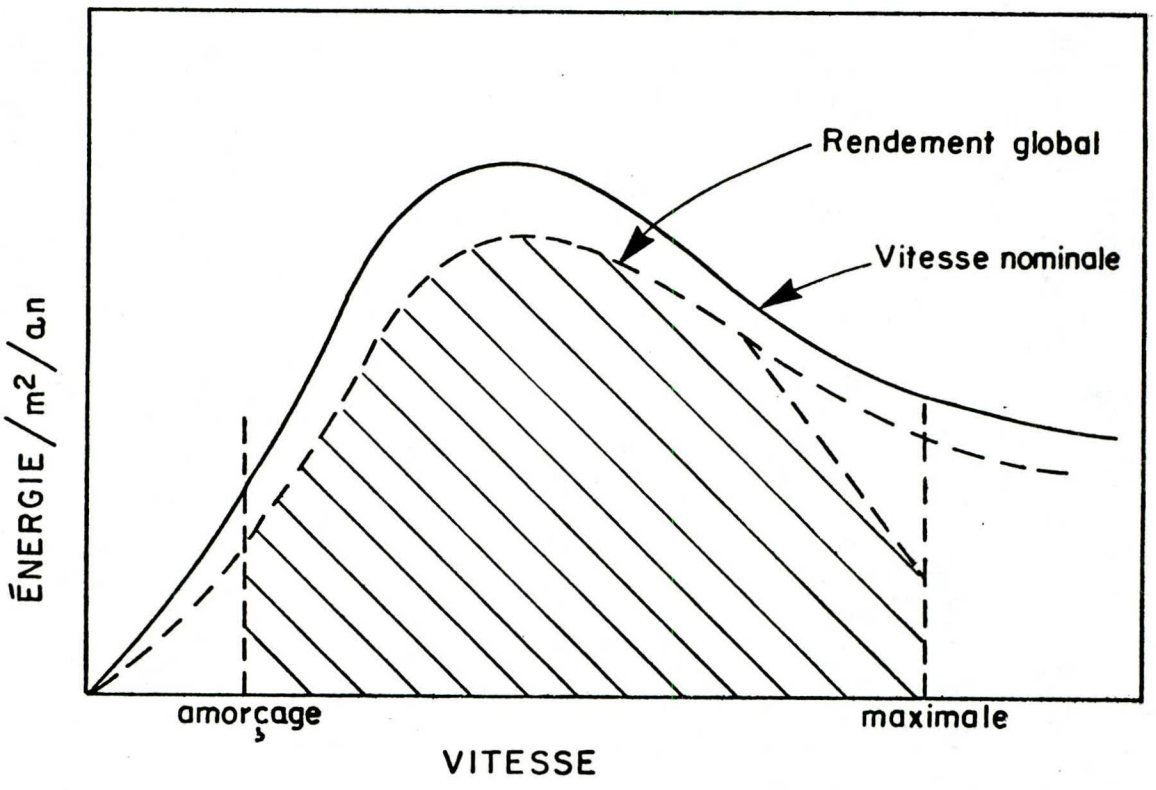

Figure 12.4 Potentiel Eolien brut et énergie nette converti

courbe de puissance, et celle de l'énergie par un facteur inférieur à un.

Lorsque *la vitesse atteint la valeur maximale*, le système est arrêté et cesse alors de produire de l'énergie.

Donc, en soustrayant de l'énergie disponible brute ces quatre tranches d'énergie non-convertible, on obtient alors l'énergie nette convertie. Cette valeur en kWh par unité de surface sera alors divisée par le coût de l'investissement pour obtenir le prix de revient du kWh.

Hauteur du pylône.- La répartition des vitesses dans la couche limite terrestre, doit être prise en considération pour le calcul de la hauteur de l'installation. En général on cherchera à placer l'éolienne à une hauteur égale à la valeur de l'épaisseur de cette couche. En supposant un profile de vitesse classique on obtient une relation semblable pour le profile de puissance dans la couche limite (1). Voir également l'équation 4.10 et la Figure 4.3.

$$P = P_0(H/H_0)^{3\alpha}$$

où P_0 représente la puissance à H_0 mètres au-dessus du sol,
H, la hauteur et
α est le coefficient dépendant de la rugosité du terrain et variant de 0.16 pour un sol de terrain plat jusqu'à 0.4 pour un terrain très accidenté.

Le type de la tour ou du pylône utilisé dépendra du régime des vents, du poids de l'éolienne et de ses accessoires et de l'accessibilité. Pour un certain type de tour préfabriquée, on peut évaluer facilement le coût tel que pratiqué dans le commerce, Tableau 12.1.

TABLEAU 12.1

Hauteur (m)	Coût ($)
9	620
12	790
15	1050
18	1300

Potentiel éolien à Sherbrooke.- Pour situer cette section dans un contexte bien défini et pratique on utilisera comme exemple les données météorologiques de la ville de Sherbrooke, provenant des relevés horaires du service météorologique du Ministère de l'Environnement.

Un traitement de ces données brutes (2) selon la manière décrite dans la section précédente, donne les courbes de fréquence-vitesse et de vitesse-durée reproduites sur les Figures 12.5 et 12.6.

En intégrant ces courbes par rapport au temps on obtient la distribution annuelle de l'énergie cinétique du vent par rapport à la vitesse, Figure 12.7.

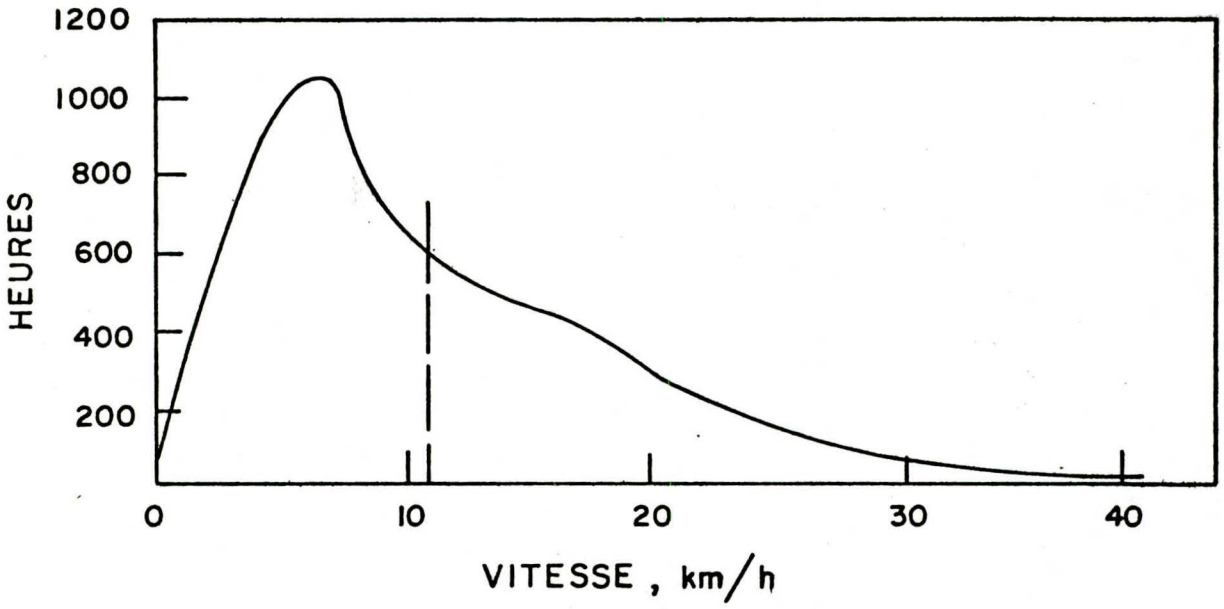

Figure 12.5 Courbe fréquence-durée pour Sherbrooke 1967-1971 (2)

L'aire sous cette courbe est l'énergie totale par mètre carré par an à Sherbrooke. Selon l'expression de Betz (voir Chapitre 3.10) le potentiel éolien brut est égal à 16/27 de cette valeur, ce qui donne, pour le cas présent 263 kWh/m^2/an.

Autre caractéristique intéressante qui peut être déterminée de ces données est *la distribution d'énergie dans chaque direction*. Le résultat est très intéressant dans le cas de Sherbrooke, tel qu'illustré à la Figure 12.8 car on remarque que 80% de l'énergie cinétique du vent est comprise dans un secteur de 90 degrés. Du point de vue économique, ceci permet d'évaluer la nécessité d'inclure ou non un mécanisme d'orientation de l'éolienne, qui peut constituer 2% du coût total.

Le dernier élément qui peut ressortir ces données concernera la nécessité d'un *système de stockage* (voir Chapitre 11.). A la Figure 12.6, de la courbe fréquence-vitesse, on remarque que la vitesse du vent est inférieure à 16km/h pendant 6460 heures soit 75% du temps. Ceci est mauvais et indique qu'il faudra un système de stockage ou un système d'appoint pour fournir de l'énergie pendant la majeure partie du temps.

Potentiel éolien aux Iles-de-la-Madeleine.- De façon analogue à la section précédente, on obtient pour les Iles-de-la-Madeleine (3) la distribution de vitesse et d'énergie aux Figures 12.9 et 12.10

12.3 *ENERGIE EOLIENNE POUR BESOINS DOMESTIQUES*

L'utilisation de l'énergie éolienne pour besoins domestiques peut

se faire avec une machine dont la taille serait dans la catégorie des *moyennes et petites puissances*. Ces machines sont disponibles sur le marché chez plusieurs manufacturiers (voir Annexe B) et par conséquent le coût de cette partie du système est relativement facile à chiffrer. Suivant la procédure établie au Chapitre 12.1, cette analyse commencera par l'évaluation du potentiel éolien et des besoins énergétiques.

Le potentiel éolien brut a été évalué à 445 kWh/m^2/an à Sherbrooke et 3032 kWh/m^2/an aux Iles-de-la-Madeleine.

Evaluation des besoins domestiques en électricité.- La seconde étape de l'étude de rentabilité sera l'évaluation des besoins en électricité pour usage domestique. Il est très difficile de faire cette étape de manière objective et les résultats peuvent facilement varier du simple au double selon

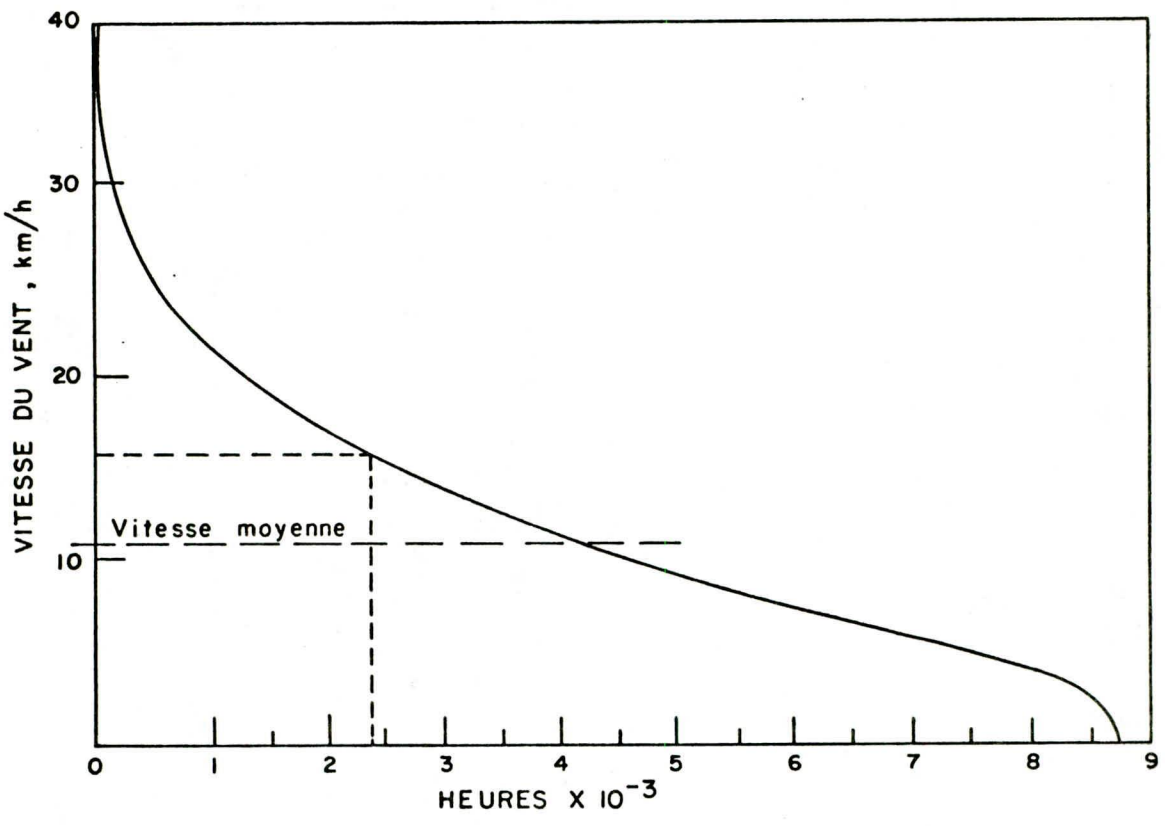

Figure 12.6 Courbe durée-vitesse pour Sherbrooke 1967-1971.

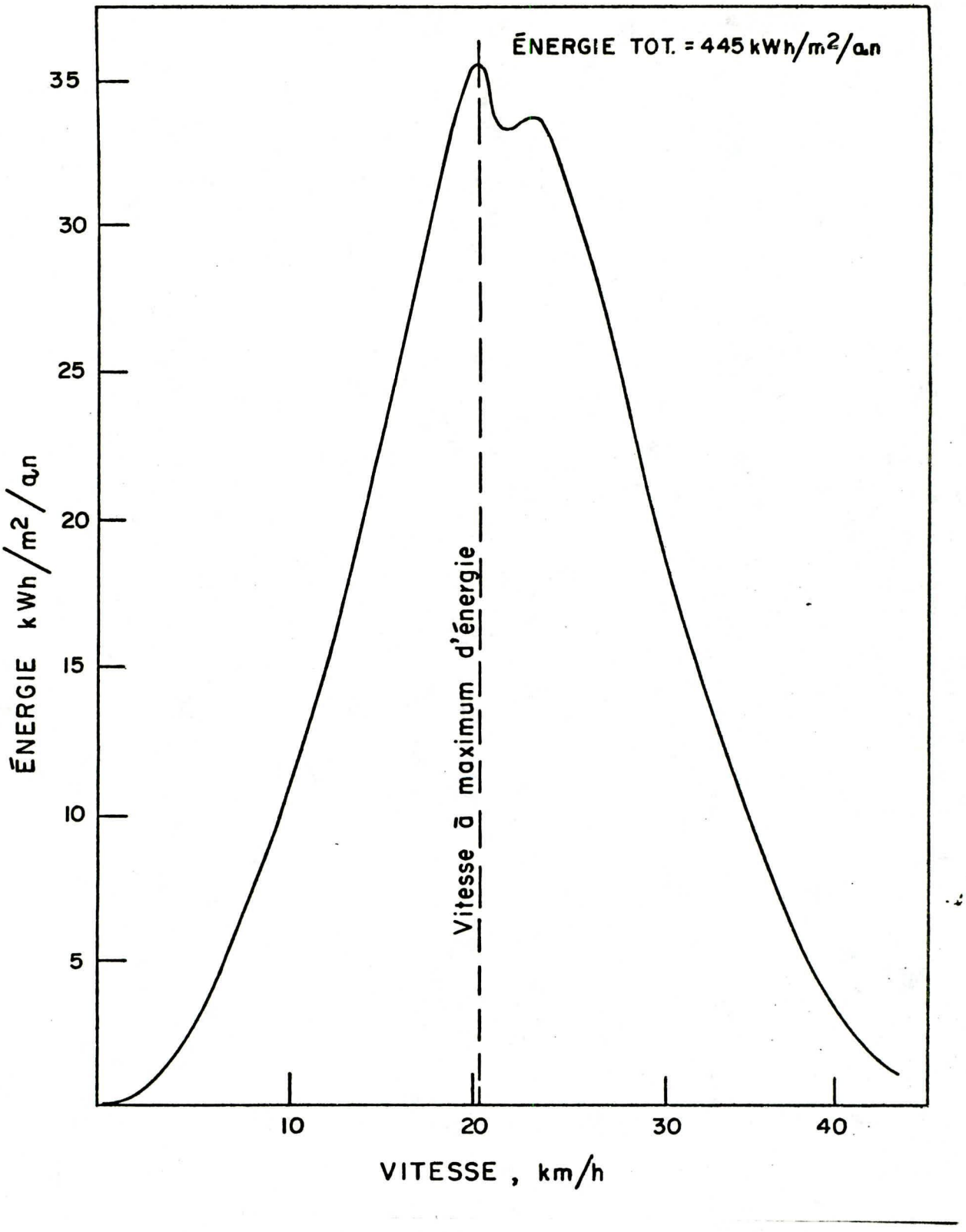

Figure 12.7 Distribution annuelle moyenne de l'énergie éolienne brute à Sherbrooke (2).

ce qui est considéré comme un besoin. Nous poserons donc certaines hypothèses et le lecteur pourra les modifier et refaire les calculs selon d'autres hypothèses.

Avec le potentiel éolien tel que celui calculé à la section précédente, il est bien évident qu'on ne peut pas envisager atteindre une autonomie énergétique pour une maison. Donc dans le présent calcul on excluera l'énergie pour le chauffage et pour la cuisson des aliments. Il reste donc à pourvoir les besoins en éclairage et l'alimentation des appareils électro-

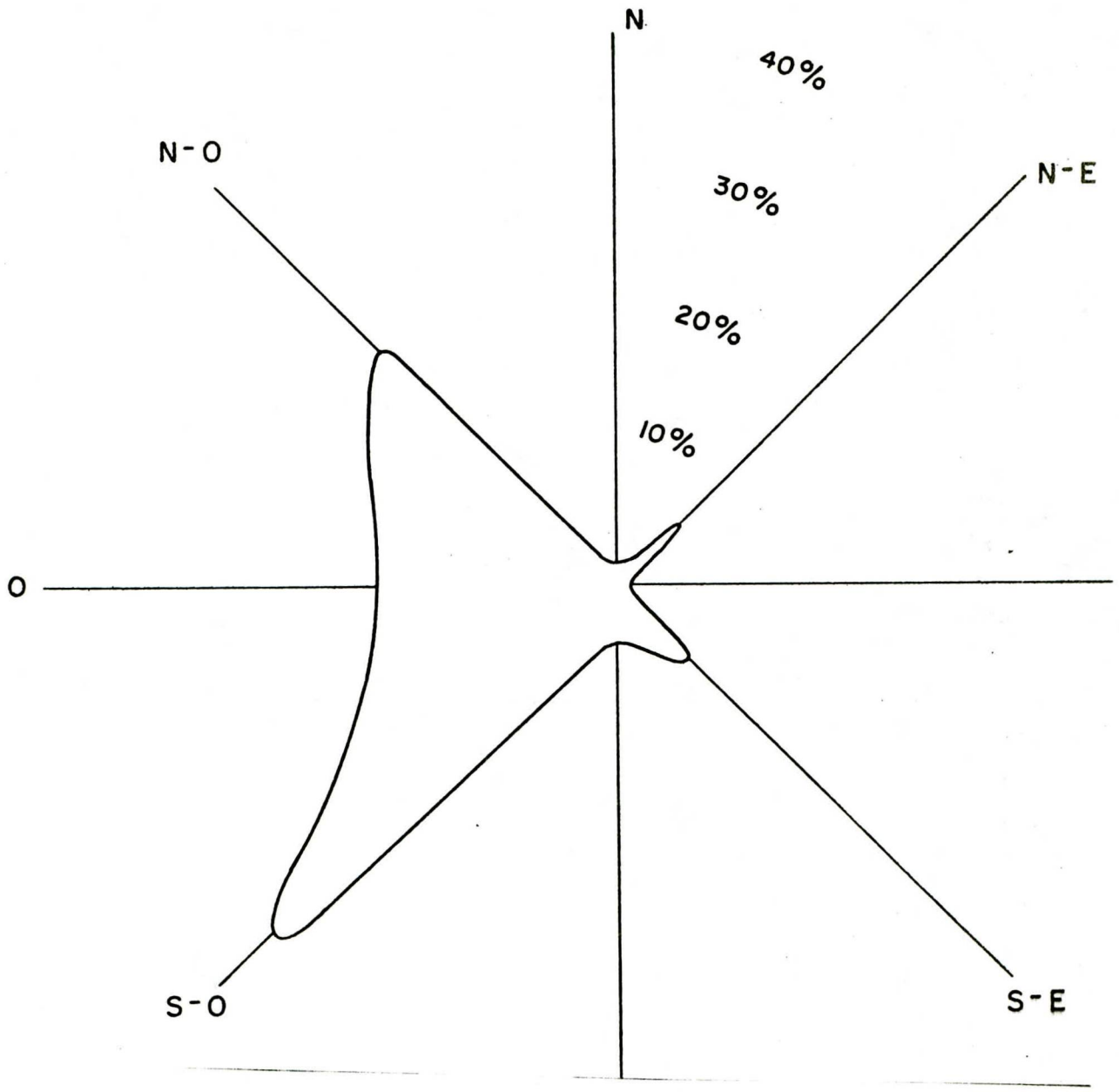

Figure 12.8 Distribution de l'énergie par direction à Sherbrooke.

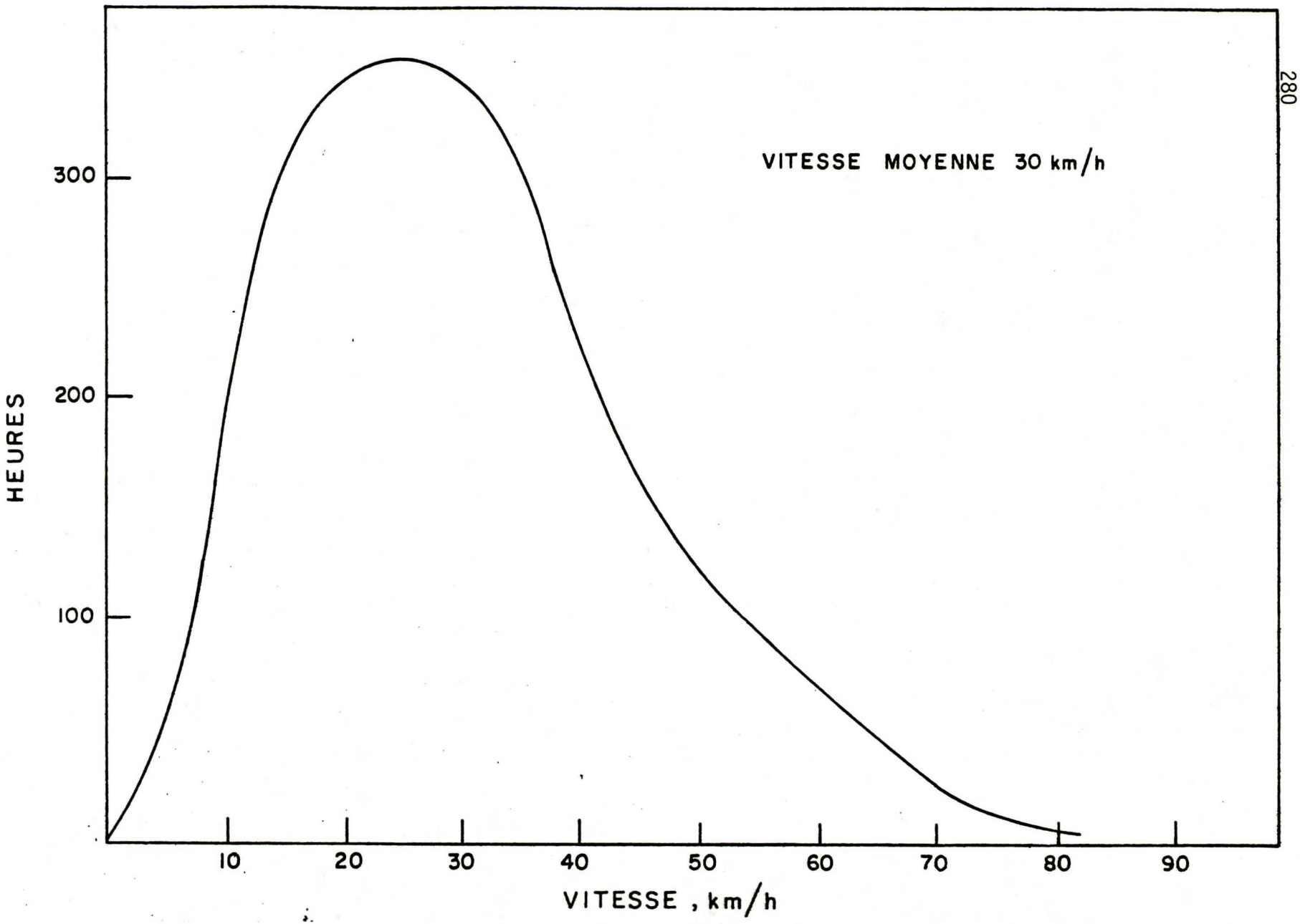

Figure 12.9 Courbe fréquence-durée pour les Iles de la Medeleine 1er mai 1966-30 avril 1967 (3)

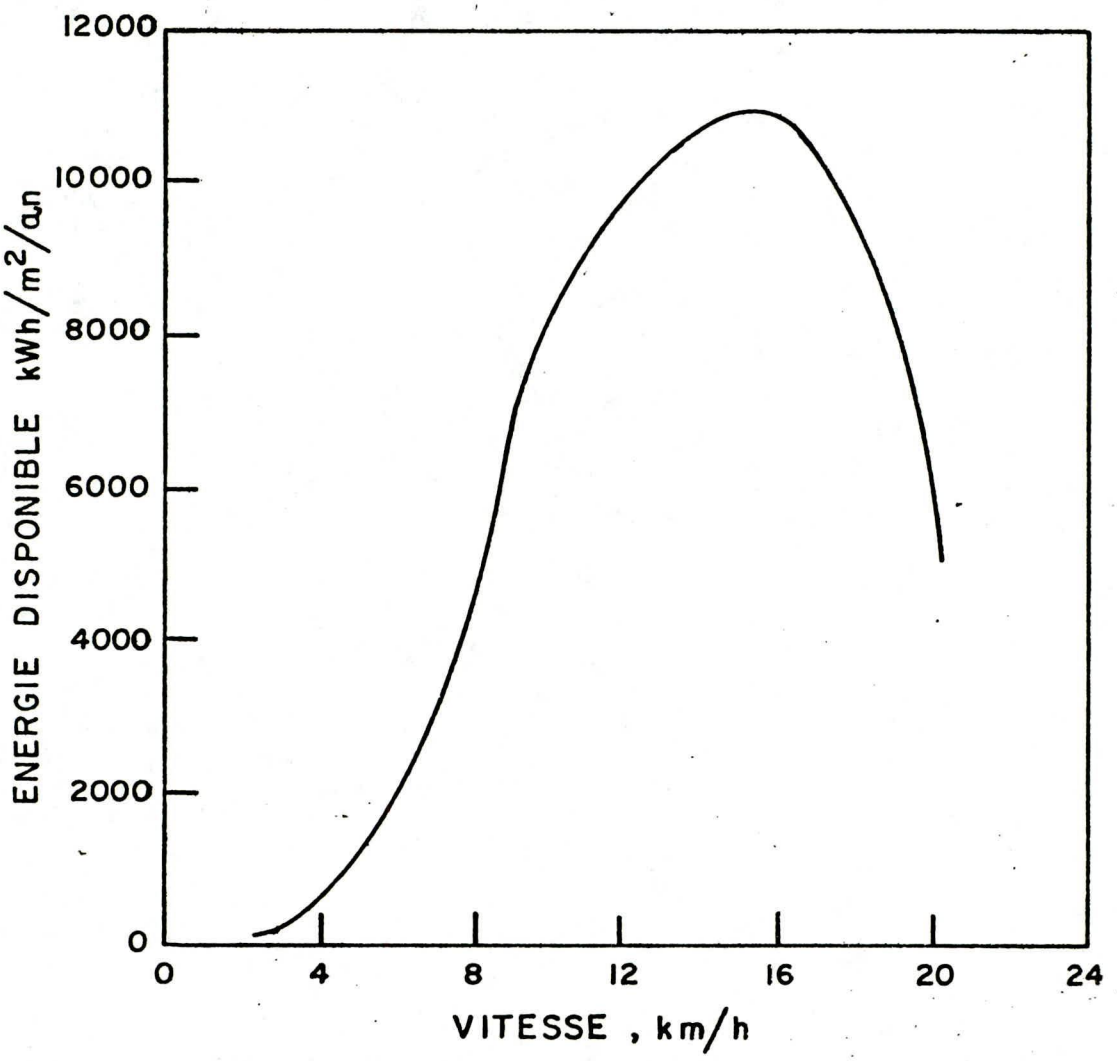
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
ENERGIE DISPONIBLE kWh/m²/an
0
4
8
12
16
20
24
VITESSE , km/h

Figure 12.10

ménagers et des récepteurs de radio et de télévision.

On supposera une famille de 4 à 5 personnes faisant une *utilisation raisonnable d'électricité.*

Pour l'éclairage, par exemple, on peut considérer une douzaine d'ampoules de 60 watts dont l'utilusation moyenne par an sera de 1300 heures, soit une consommation de 936 kWh.

Pour l'appareillage électroménager, on incluera ouvre-boîtes, réfrigérateur, grille-pain, bouilloire, etc. Leur consommation sera chiffrée à 1800 kWh.

On peut évaluer la consommation d'*appareils divers* tels que: ventilateurs, outils, radio, téléviseurs, etc. à 470 kWh. Donc, sur l'ensemble on considère une consommation annuelle de 3206 kWh.

De nouveau, une mise en garde s'avère nécessaire. Ces chiffres sont très contestables et peuvent être refutés très facilement. On doit toutefois rappeller que l'on se situe dans un contexte d'utilisation d'une énergie douce dans un endroit où d'autre sources d'approvisionnement ne sont pas disponibles ou chères. Donc on se place dans un cadre de consommation modérée.

Constitution de l'installation.- Il faut maintenant préciser la nature du système et surtout ses composantes que l'on regroupera en trois catégories:

i. *éolienne: pales, noyeu, pylône, mécanismes d'orientation et du freinage;*
ii. *système de conversion: générateur, roulements, mécanismes de transmission et de régulation;*
iii. *système de stockage: convertisseurs, accummulateurs, régulateurs de tensions.*

Dans le choix d'une *éolienne* on optera pour le type à axe horizontal car celles-ci sont disponibles sur le marché avec tous les mécanismes et composantes pour produire du courant alternatif. La hauteur du pylône sera calculée selon la méthode exposée avant et donnera un coût de $700.

Le système de conversion est discuté sur tous ses aspects dans le chapitre 8.

Pour *le stockage* (voir le chapitre 11.) on prévoit 2 jours comme la durée maximum de calme. Ce qui, compte tenu des besoins quotidiens évalués à 8.78 kWh, c'est-ã-dire environ 370 watts, permet de calculer le nombre de batteries.

Donc la capacité des batteries d'accumulateurs sera de 150 Ah, pour une tension de 115 volts. Si l'on désire ne pas dépasser une réserve de 20%, alors la capacité sera à peu près de 190 Ah. Pour six batteries de 6 volts chacune, 32 Ah par batterie, constituant un investissement de l'ordre de $450., auquel il faut ajouter un convertisseur DC-AC d'une centaine de dollars.

Il faut maintenant arrêter le choix de l'éolienne proprement dit. Pour ce genre de machine (hélice) le rendement global est de l'ordre de 70%. Donc l'énergie convertie nette sera égale à 184 kWh/m^2/an et, si l'on soustraie l'énergie en-dessous de la vitesse maximum, on obtient 150 kWh/m^2/an pour des besoins chiffrés à 3200 kWh/an. Il faut donc que la superficie captée soit de l'ordre de 21 m^2, soit un diamètre d'environ 5 m. De plus, l'examen de la Figure 12.7 revèle que la vitesse ou se situe l'énergie maximum est de 5.8 m/s. Il existe trois choix de manufacturiers pouvant répondre à ces exigences:

20.1 km/h

A. 2 éoliennes Dunlite 2000 watts au prix de 2 x 2837 = $5674;
B. 1 éolienne Elecktro WVG50G de 5000 watts à $6360;
C. 1 éolienne Aérowatt 4100FP7, pour le prix de $16500.

La première remarque qui s'impose est que la puissance nominale du manufacturier est citée pour des vitesses de 11.1 m/s à 18.05 m/s.

Donc, il ne faut pas tenir compte de cette valeur nominale (ou puissance installée) mais plutôt il faut calculer la puissance à partir du diamètre ou utiliser les courbes puissance-vitesse du manufacturier si elles sont disponibles. Et pour le cas présent, les trois machines fourniront à peu près toutes la même puissance, à des coûts variant dans un rapport de un à trois.

Cet écart représente une réelle différence dans la qualité des matériaux, de la conception et de la fabrication de la machine. Et ceci dans la pratique se traduit effectivement par une plus grande fiabilité et longévité de l'équipement et un plus faible coût d'entretien. Les coûts des trois installations A, B et C donnés dans le Tableau 12.2, et l'énergie convertie dans les trois cas pour les conditions de vents à Sherbrooke et aux Iles de la Madeleine sur le Tableau 12.3.

TABLEAU 12.2 Comparaison des coûts

	A	B	C
Eolienne	5674	6360	16500
Pylône	1200	600	600
Accumulateurs	450	450	450
Divers	200	200	200
Main d'oeuvre	1000	1000	1000
Total	8224	8610	18750

TABLEAU 12.3 Comparaison des capacités

	A	B	C
Puissance installée en W	4000	5000	4100
Energie convertie par an à Sherbrooke en kWh	3200	3200	3200
Energie convertie par an aux Iles de la Madeleine en kWh	21455	21455	21455

Et finalement, en supposant un taux d'intrêt de 11% amorti sur 25 ans, on obtient le prix de revient sur kWh.

TABLEAU 12.4 Prix de revient du kWh.

	A	B	C
Amortissement en $	985	995	2167
Entretien en $	800	800	100
Coût total annuel en $	1785	1785	2267
Coût du kWh à Sherbrooke en ¢	56	56	71
Coût du kWh aux Iles de la Madeleine en ¢	8	8	11

12.4 *CHAUFFAGE DOMESTIQUE PAR EOLIENNE*

L'utilisation de l'énergie éolienne pour fins de chauffage d'une habitation a été étudiée à l'Université de Sherbrooke (4), (5) et (6). Comme pour toutes les applications de l'énergie éolienne, il est bien entendu que celle-ci doit être envisagée pour des régions où les autres sources énergétiques classiques (réseau électrique, pétrole, charbon) sont inaccessibles ou très chères, et que le potentiel éolien soit élevé.

Seulement dans de telles conditions peut-on espérer une conversion rentable de l'énergie éolienne. Or de nombreuses localités dans les régions nordiques et côtières du Canada réunissent ces deux conditions, et pour lesquelles le chauffage domestique éolien serait viable économiquement et techniquement. Les trois étapes d'une telle étude sont:

i. l'évaluation du potentiel éolien;
ii. l'évaluation des pertes thermiques;
iii. la constitution d'un système de chauffage.

Potentiel éolien.- Cette étape sera identique à celle du chapitre 12.3 et on utilisera les données de Sherbrooke et celles des Iles de la Madeleine.

Pertes thermiques.- Dans le calcul des pertes thermiques on fera l'hypothèse d'une habitation unifamiliale moyenne de 6 pièces ayant une surface d'environ 165 m^2 dont on désire maintenir l'intérieur à une température de 21°C. Les pertes se composent des échanges par conduction, convection et par infiltration et sont évaluées selon les méthodes de transfert de chaleur (5). Soit, pour *les pertes par conduction:*

$$Q_C = (T_i - T_e) \sum_i U_i A_i \qquad (12.3)$$

et les *pertes par infiltration:*

$$Q_I = \rho\, C_p (T_i - T_e) \sum_i F_i I_i / 2$$

où T_i = température intérieure
T_e = température extérieure

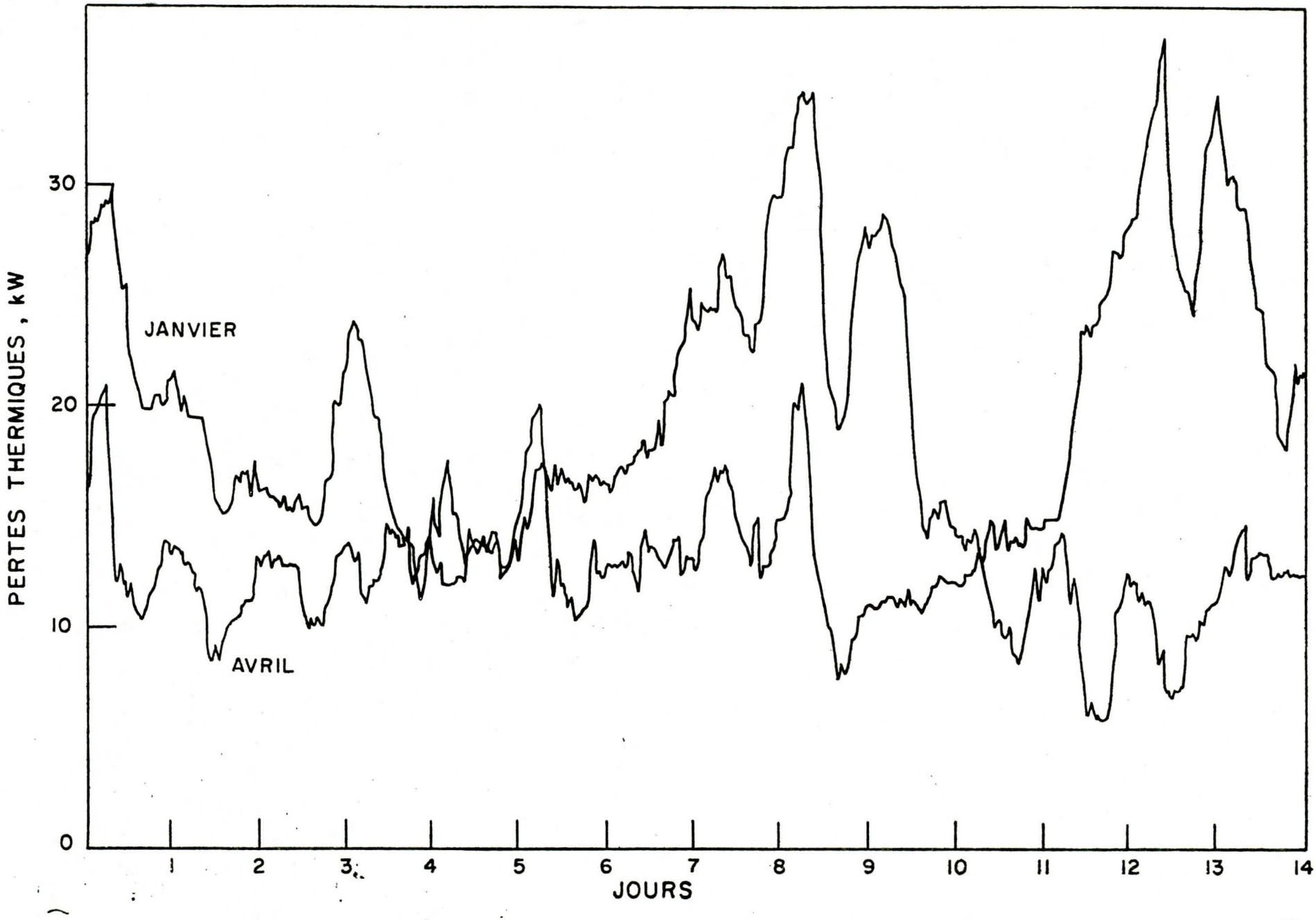

Figure 12.11 Perte thermiques de la maison type pour les deux premières semaines de janvier et avril 1971 (5).

A_i = superficie des composantes de la maison (c'est-à-dire portes, murs, toiture, plancher, etc.)
U_i = conductance totale des composantes A_i
F_i = longueur des infiltrations
I_i = coefficient des différents types d'infiltration
ρ = densité de l'air
c_p = chaleur spécifique à pression constante.

Les pertes totales sont égales à la somme de Q_C et Q_I dont les unités sont des kJ/h ou des kW équivalents à litres d'huile/heure. A partir des données météorologiques horaires (température et vitesse du vent), on calcule les pertes thermiques en fonction du temps, donnant typiquement des résultats illustrés à la Figure 12.11, (5).

En faisant une intégration numérique on obtient les pertes totales par mois ainsi que des moyennes mensuelles, pour la région de Sherbrooke dans le Tableau 12.5.

TABLEAU 12.5 Pertes thermiques pour habitation type à Sherbrooke

Mois	Pertes moyennes, en kW	Pertes thermiques totales kWh x 10^{-4}	Equivalent litre fuel
Janvier	21.43	1.61	1680
Février	16.76	1.17	1221
Mars	14.53	1.13	1182
Avril	12.28	0.86	898

De façon identique, on estime les pertes thermiques pour une habitation identique aux Iles de la Madeleine où les températures moyennes sont de l'ordre de 6 degrés Celsius inférieurs à celles de Sherbrooke.

TABLEAU 12.6 Pertes thermiques pour habitation type aux Iles de la Madeleine

Mois	Pertes moyennes, en kW	Pertes thermiques totales kWh x 10^{-4}	Equivalent litre fuel
Janvier	24.75	1.86	1944
Février	19.89	1.39	1452
Mars	17.60	1.36	1421
Avril	15.84	1.11	1160

Choix du système de chauffage.- A l'Université de Sherbrooke, plusieurs systèmes de chauffage ont été étudiés. Pour fins de l'étude économique nous n'en retiendrons que deux qui constituent les possibilités

extrêmes, c'est-à-dire le plus simple et plus performant;

i. système à dissipation électrique directe;
ii. système de pompe à chaleur.

Le système à dissipation électrique directe est illustré à la Figure 12.12. Il comprend: une éolienne, un générateur et une résistance électrique. Il faut noter que ce système utilise le courant alternatif tel que produit et puisqu'il sera dissipé, il n'est pas nécessaire de contrôler ni la tension ni la fréquence. Cette caractéristique constitue un atout du point de vue de la rentabilité car il y a peu de composantes réduisant le coût et augmentant la fiabilité de l'installation.

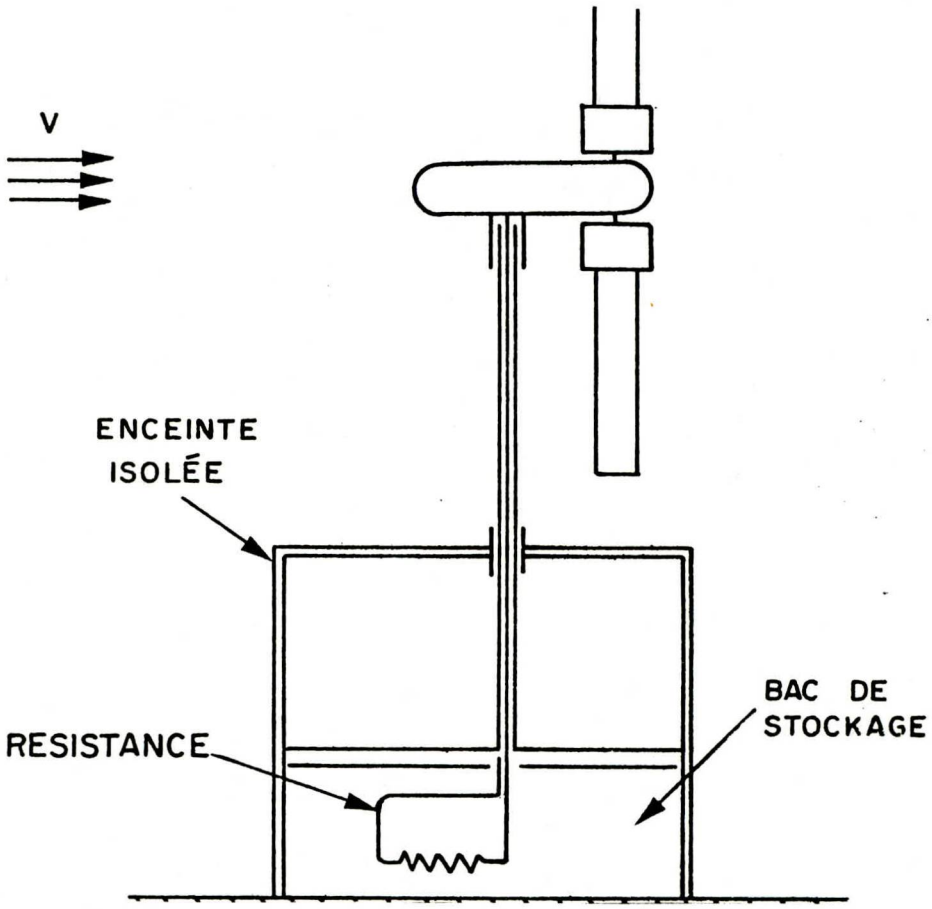

Figure 12.12 Système de chauffage par dissipation électrique

Les composantes du *système de pompe à chaleur*, montrées à la Figure 12.13, sont: un compresseur entraîné par une éolienne, un condenseur, une valve de détente et un évaporateur. L'évaporateur est enfoui dans le sol où il puise une certaine quantité de chaleur qui est ensuite rejetée à l'intérieur de la maison par le condenseur. Le fluide utilisé sera typiquement du fréon et le cycle thermodynamique comprendra deux parties à pression constantes: une compression isentropique et une détente adiabatique. En plus du coût et de l'installation de l'éolienne, il

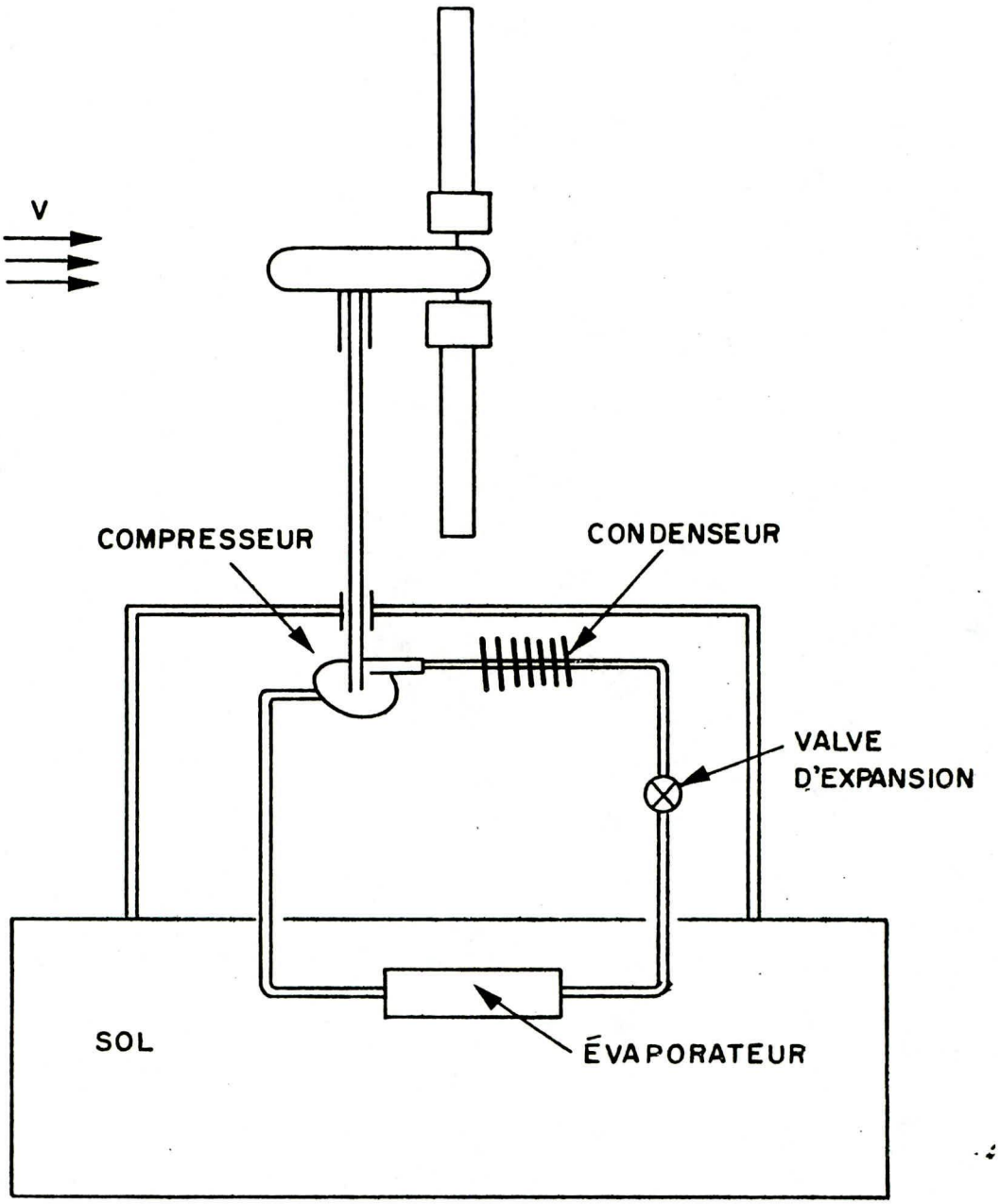

Figure 12.13 Système de chauffage de pompe à chaleur.

faut prévoir pour ce système, l'installation dans le sol (excavation, etc.) de l'évaporateur, opération qu'il faudrait envisager au début de la construction.

La taille de l'éolienne pour le premier système doit être déterminée

en fonction des pertes thermiques calculées précédemment, du potentiel éolien (qui sera caractérisé par une vitesse moyenne) et du rendement global de l'aérogénérateur. Selon Galanis (5), le diamètre de l'éolienne peut s'exprimer par la relation suivante:

$$D_1^2 = \frac{8}{\pi} \frac{Q_{p,T}}{\eta \rho V_m^3} \qquad (2.14)$$

où $Q_{p,T}$ = pertes thermiques;
η = rendement global de l'aérogénérateur; $\simeq 4$
ρ = densité de l'air; $\simeq 1.3\ Kg/m^3$
V_m = vitesse moyenne du vent.

De façon analogue en (5), on propose pour le diamètre de l'aérogénérateur du système de pompe à chaleur l'expression suivante.

$$D_1^2 = \frac{8}{\pi} \frac{Q_{p,T}}{\eta \rho V_m^3} \quad K$$

Cette relation contient le facteur K relié (de façon compliquée) au rapport de compression de la pompe à chaleur et illustre très clairement l'avantage d'une pompe à chaleur. Le facteur K étant inférieur à un, ce système nécessitera une éolienne de taille toujours plus petite que pour le système à dissipation. La Figure 12.14 illustre cette différence pour un vent moyen de 3.6 m/s et pour un rapport de compression de 3 pour la pompe à chaleur.

Le même calcul est répété et illustré à la Figure 12.15 pour des conditions moyennes de vent de 30 km/h ou 8.33 m/s représentant les conditions prévalant par exemple, aux Iles de la Madeleine. On remarquera la très grande différence avec les résultats pour des vents de 13 km/h ou 3.61 m/s . Le diamètre d'une éolienne pour subvenir aux mêmes pertes thermiques, est réduit par un facteur de 0.28, résultant dans un coût beaucoup moindre pour les deux systèmes de chauffage proposés.

Ces deux graphiques vont nous permettre de calculer le diamètre de l'éolienne en fonction des pertes thermiques. Un examen rapide indique pour un endroit comme Sherbrooke avec une vitesse moyenne du vent de l'ordre de 13 km/h ou 3.61 m/s, qu'il faudrait une éolienne avec un diamètre supérieur à 75m pour compenser les pertes pendant le mois le plus froid. Comme de telles éoliennes ne sont encore pas disponibles de façon commerciale, il n'est pas envisageable pour le moment et pour un avenir prochain, d'envisager un système de chauffage autonome dans ces endroits. Par contre, aux Iles de la Medeleine, où le potentiel éolien est beaucoup plus favorable, une telle possibilité est prafaitement envisageable avec les installation éoliennes décrites au Chapitre 12.4, c'est-à-dire avec des éoliennes de 3.5 à 6 m de diamètre. Donc, on ne considèrera que cette dernière localité et on va comparer (A) le système à dissipation électrique directe, avec (B) celui à pompe à chaleur.

A. D'après la relation à la Figure 12.15, les pertes thermiques peuvent être comblées par deux éoliennes de 5 mètres de diamètre à un prix de $6,300 chacune.

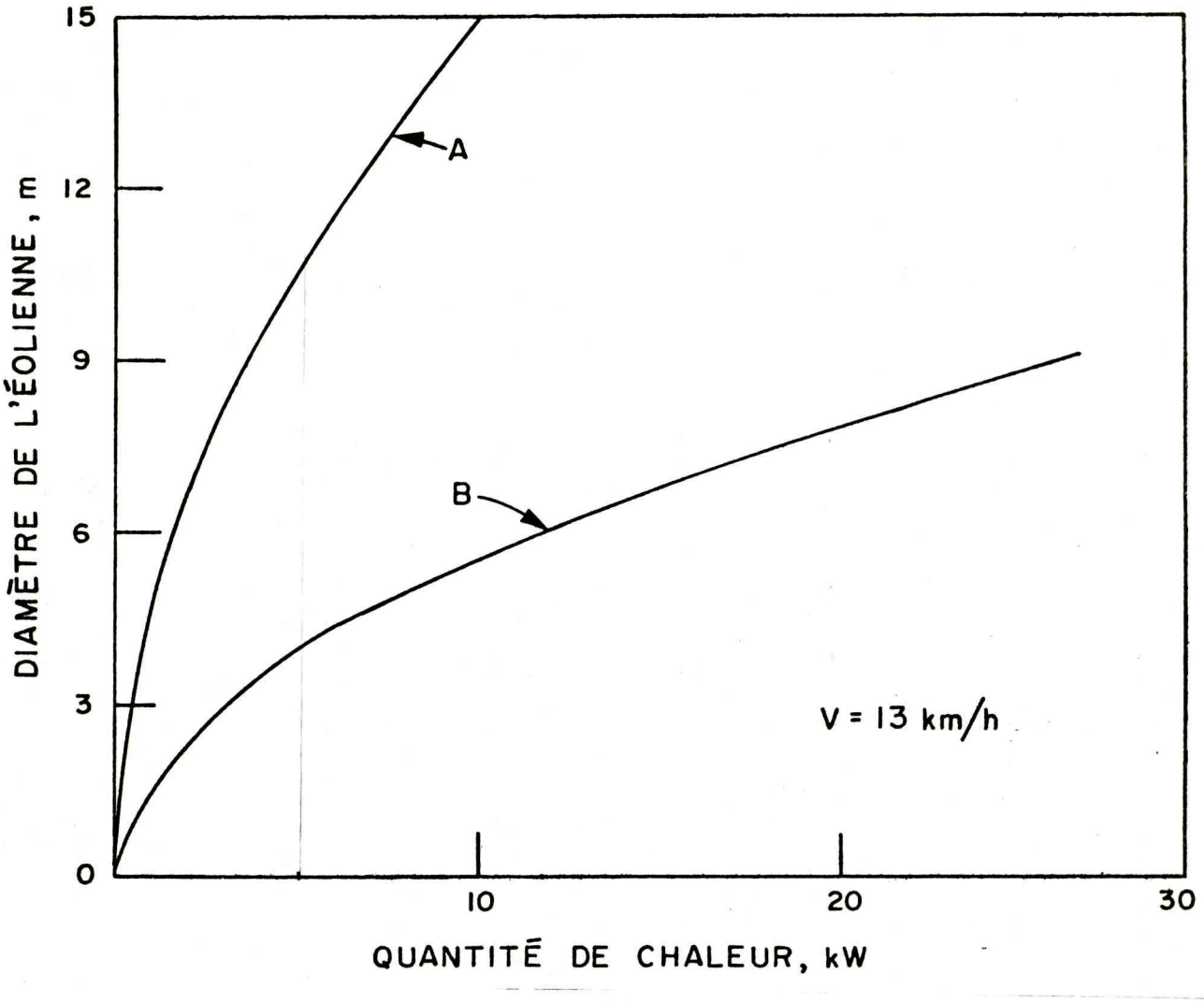

Figure 12.14 Comparaison de deux systèmes à Sherbrooke

B. Pour ce système, une seule éolienne de 2.5 à 3.0 mètres à un prix de $2600 suffira. Bien entendu qu'il faut ajouter le coût de la pompe à chaleur et de l'installation de l'évaporation dans le sol à cette figure.

Cette comparaison est présentée au Tableau 12.7.

La capacité installée de ces deux systèmes a été calculée pour les pertes thermiques du mois de janvier, et donc pour les autres mois, l'installation serait sous-utilisée. Normalement, il serait possible d'obtenir un système moins cher si on tentait de combler seulement une fraction des pertes, la différence provenant d'un système de chauffage d'appoint. En additionnant les pertes moyennes pour les quatre mois du Tableau 12.6 et en multipliant celles-ci par deux pour obtenir une estimation (pessimiste) des pertes thermiques annuelles, on obtient la capacité installée, le chauffage annuel produit en kWh et le chauffage annuel en équivalent litres de fuel.

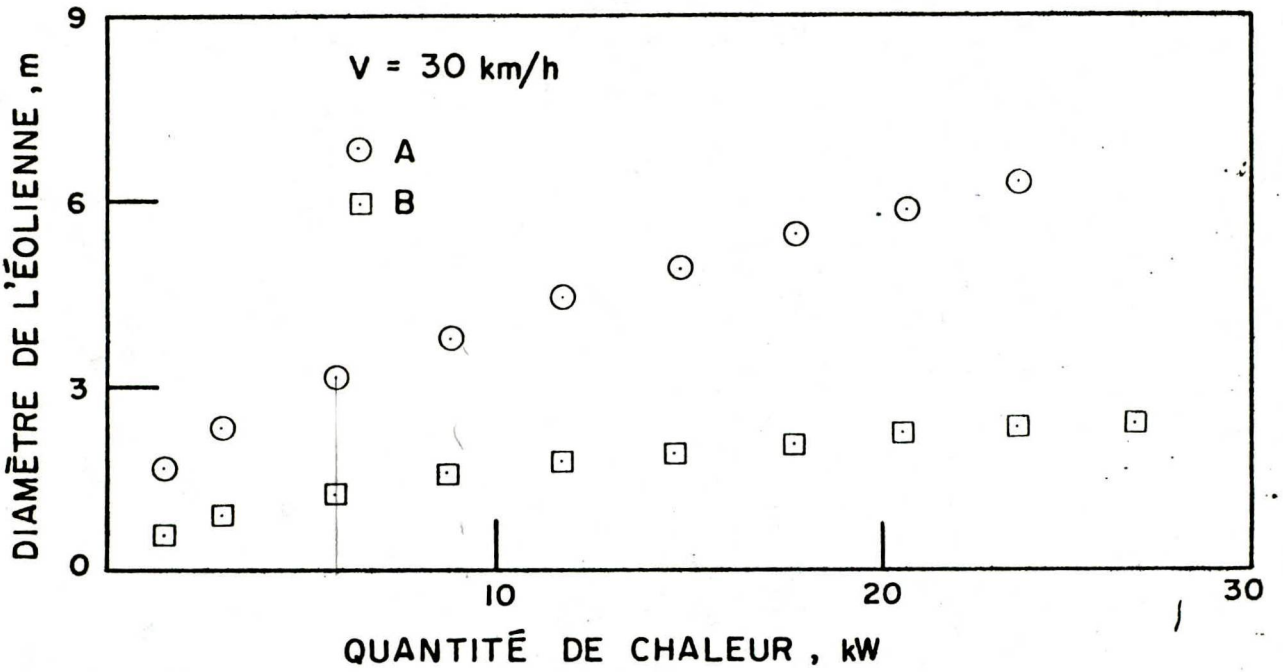

Figure 12.15 Performance du système à dissipation directe et du système avec pompe à chaleur.

TABLEAU 12.7 Comparaison des coûts des systèmes de chauffage

	A	B
Aérogénérateur	$12600	$2600
Pylône	1200	600
Divers	200	200
Installation	1000	1000
Pompe à chaleur	-	2600
Evaporateur	-	1100
Excavation	-	500
Total	15000	8600

TABLEAU 12.8 Capacités des systèmes de chauffage

	A	B
Puissance installée kW	12.0	1.2
Chauffage annuel en kWh x 10^4	11.4	11.4
Chauffage annuel en Equi. litre de fuel	11954	11954

Finalement en supposant un taux d'intérêt de 11% amorti sur 25 ans, on obtient le prix de revient du kWh thermique ou le prix de revient pour économiser un litre de fuel montré au Tableau 12.9.

TABLEAU 12.9 Prix de revient du chauffage éolien

	A	B
Amortissement annuel de l'investissement	1734	936
Entretien éolienne, $	800	800
Entretien du système, $	10	200
Total, $/an	2544	1936
Prix du kWh thermique, ¢	22	17
Prix du litre de fuel économisé, ¢	21	16

REFERENCES

1. Chilcott, R.E., "Design speed for wind turbines", Fifth Australian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics, Dec. 9-13, 1974, New Zealand.
2. Mercadier, Y., "Statistiques Eoliennes pour Sherbrooke", Rapport Interne, Dép. Génie Mécanique, Université de Sherbrooke,
3. Lawand, T., "Potential of Wind power in Meeting Canadian Energy needs", Dans: Energie éolienne: Possibilités et Réalisation, Université de Sherbrooke, Mai 1974, Ed.R. Camarero.
4. Mercadier, Y., "Un prototype de chauffage hydrothermique à partir de l'énergie éolienne", Dép. de génie mécanique, Université de Sherbrooke, Rapport MEC/74/1, 1974
5. Galanis, N., et Delisle A., "L'énergie éolienne et le chauffage-domestique, dép. de génie mécanique, Université de Sherbrooke, Rapport MEC/72/4.
6. Energie éolienne: Possibilités et Réalisations, Colloque, Université de Sherbrooke, Mai 1974, Ed. R. Camarero.

A CONSULTER
SUR PLACE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00288949 9