

50377
1994
225-1

26 102 333
50377
1994
225-1

THESE

**PRESENTEE
A L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE

par

François PAUL

**LE VENT DANS LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS, VARIABILITE
SPATIO-TEMPORELLE ET APPLICATIONS A L'ENERGIE EOLIENNE**

Volume I

soutenu le 9 Décembre 1994 devant la commission d'examen :

Président :

M. C. Kergomard, Professeur à l'Université des Sciences et Techniques de Lille

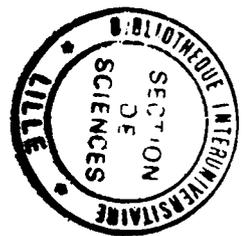
Rapporteurs :

M. M. Erpicum, Professeur à l'Université de l'Etat à Liège

M. P. Carrega, Maître de conférence, Docteur d'Etat à l'Université de Nice

Examineur :

M. G. Petit-Renaud, Maître de conférence à l'Université des Sciences et Techniques de Lille



RESUME

Le Nord de la France est une région particulièrement venteuse. En effet, la vitesse moyenne du vent dépasse 6 m/s sur le littoral et sur les collines proches du littoral. Les directions dominantes des vents sont le Sud, le Sud-Ouest et l'Ouest présents tout au long de l'année. Les secteurs Nord et Nord-Est sont des directions dominantes secondaires. La fréquence élevée des temps perturbés explique la prédominance des vents de secteur Sud-Ouest et Ouest dans la région Nord-Pas-de-Calais mais aussi l'importance de la vitesse moyenne. La vitesse moyenne du vent fluctue d'une année à l'autre mais de façon modérée. L'hiver est généralement la saison la plus venteuse, suivi du printemps et de l'automne, tandis que l'été est la saison la plus calme. Ce régime à hiver prépondérant prédomine sur la moitié Nord-Ouest du pays. La variation diurne de la vitesse du vent, liée à celle de la température, présente un maximum au début de l'après-midi et un minimum au début de la journée. La région Nord-Pas-de-Calais possède un potentiel éolien qui mérite d'être exploité. La ressource éolienne régionale a pu être estimée à l'aide du logiciel WAsP. Dans les conditions économiques actuelles et en tenant compte des contraintes humaines et environnementales, il serait possible d'installer dans le Nord-Pas-de-Calais 60 MW éolien dans des parcs éoliens. Un autre trait climatologique de la région du Nord est la grande fréquence des vents forts, de 60 à 120 jours par an. Les vitesses maximales observées depuis 1945 dépassent 40 m/s dans les 5 stations synoptiques régionales. La plupart des éoliennes résisteraient aux tempêtes; par contre, certaines seraient détruites lors du passage des trombes les plus fortes ainsi que lors des coups de vent de grain les plus violents.

ABSTRACT

The North of France is particularly windy. The average wind speed is higher than 6 m/s on the coast and on the hilltops in coastal areas. The prevailing winds are southerly, south-westerly throughout the year. Secondary prevailing winds blow from the north and the north-east. Frequently poor weather is associated with prevailing south-westerly and westerly winds and high average wind speeds. The average wind speed varies little from one year to the next. Winter is usually the most windy season, followed by spring then autumn, while summer is the calmest season. This wind speed pattern prevails throughout north-west France. Both wind speeds and temperatures vary throughout the day with a maximum early in the afternoon and a minimum early in the morning. The "Nord-Pas-de-Calais" Region had a wind energy potential that is worth exploiting. The wind energy potential was assessed using the WAsP software. In the current economic climate and taking into account human and environmental constraints, the "Nord-Pas-de-Calais" Region has the potential to provide 60 MW of wind power from wind farms. Another climatic feature of the North of France is the frequent high winds occurring on 60 to 120 days in any year. The maximum wind speeds recorded since 1945 are higher than 40 m/s at the five main meteorological stations in the "Nord-Pas-de-Calais" Region. Although most wind turbines would survive the storms, some would be destroyed by the more violent tornadoes and downbursts.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Norden Frankreichs ist eine sehr windige Region. Die mittlere Windgeschwindigkeit überschreitet 6 m/Sek. im Küstengebiet und auf den Hügeln nahe des Küstengebietes. Die dominierenden Windrichtungen sind Süd, Südwest und West und der Wind weht das ganze Jahr über. Die Windrichtungen Nord und Nordost sind wesentlich seltener und zählen erst in zweiter Linie. Bei hoher Häufigkeit der atmosphärischen Störungen erklärt die Vorherrschaft des Windes der Richtungen Südwest und West in der Region Nord-Pas-de-Calais auch die Bedeutsamkeit für die mittlere Geschwindigkeit. Die mittlere Windgeschwindigkeit verändert sich jährlich, allerdings nur leicht. Der Winter ist im allgemeinen die windigste Jahreszeit gefolgt von Frühling und Herbst, während der Sommer die ruhigste Jahreszeit darstellt. Dies Regime im Winter ist auch ausschlaggebend für die Vorherrschaft in der Nordwesthälfte des Landes. Die tägliche Veränderung der Windgeschwindigkeit verbunden mit der der Temperatur stellt ein Maximum Anfang des Nachmittags und ein Minimum am Tagesanfang dar. Die Region Nord-Pas-de-Calais besitzt ein Windpotential, welches ausgenutzt zu werden verdient. Das regionale Windpotential wurde mit Hilfe der Systemsoftware WAsP geschätzt. In der aktuellen wirtschaftlichen Situation und unter der Einbeziehung der menschlichen und umweltbedingten Zwänge wäre es möglich 60 MW Windenergie in Windparks im Nord-Pas-de-Calais aufzustellen. Eine andere Besonderheit der Region Nord ist die grosse Häufigkeit starken Windes während 60 bis 120 Tagen im Jahr. Die höchste seit 1945 beobachtete Windgeschwindigkeit überschreitet 40 m/Sek. in den fünf regionalen meteorologischen Stationen. Die meisten Windkraftanlagen widerstehen Unwettern aber einige werden bei durchziehenden starken Tornados oder sehr starken Windstößen während grosser Regenfälle beschädigt oder zerstört.

Il n'est pas possible de citer toutes les personnes qui, à un moment ou à un autre, ont pu m'aider dans la réalisation de cette longue recherche sur le vent dans la région Nord-Pas-de-Calais.

Je tiens toutefois à remercier tout particulièrement les personnes suivantes :

- MM. Gérard PETIT-RENAUD, Claude KERGOMARD, Michel ERPICUM, Pierre BIAYS, Pierre CARREGA, Jean DESSENS et G. T. MEADEN, pour leur aide, leur soutien, leur disponibilité;

- MM. Nessraddine ADOUK, Abdelhamide MOUHDI et Victor BAKKAM, pour leurs conseils, les longues discussions enrichissantes et l'entraide au Laboratoire de Climatologie;

- M. CHAPELET ainsi que le personnel de METEO FRANCE;

- M. FOISSEY de l'I.G.N. Lille;

- MM. Philippe BRUYERRE et Franck DAVID, Mmes Marie-Noëlle REBOULET et Anne-Marie VAILLANT, mes collègues d'ESPACE EOLIEN DEVELOPPEMENT;

- MM. Hervé PIGNON de l'ADEME Nord-Pas-de-Calais, Alain VILLAIN et Bruno FRIMAT du Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais;

- Mmes DEYGHÈRE, LONGY et MARTIN pour leur amabilité et leur soutien logistique efficace;

- Claudine, tous les membres de ma famille ainsi que mes amis qui m'ont constamment soutenu et encouragé durant ces quelques années de recherche.

TABLE DES MATIERES

| | Pages |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| INTRODUCTION | 1 |
| | |
| PRESENTATION DE LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS | |
| Le Nord-Pas-de-Calais : une grande variété de régions naturelles | 3 |
| Présentation des aspects climatiques du Nord de la France | 10 |
| | |
| LE VENT DANS LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS | |
| Le vent | 16 |
| Les stations météorologiques de la région Nord-Pas-de-Calais | 20 |
| Les données de vent | 30 |
| Critique des données | 38 |
| La vitesse moyenne du vent dans la région Nord-Pas-de-Calais | 41 |
| Estimation de la vitesse moyenne du vent du poste anémométrique du Cap Gris-Nez et des 9 stations automatiques de la région Nord-Pas-de-Calais | 45 |
| Corrections de hauteur et de rugosité | 48 |
| Cartographie de la vitesse du vent de la région Nord-Pas-de-Calais | 51 |
| Le Nord, une région favorisée par sa ressource éolienne | 53 |
| | |
| DIRECTION DES VENTS ET CIRCULATION ATMOSPHERIQUE | |
| Direction des vents | 57 |
| Circulation atmosphérique, direction et vitesse du vent | 66 |

LES VARIATIONS TEMPORELLES DE LA VITESSE DU VENT DANS LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS

| | |
|---------------------------------------------------|----|
| Les variations annuelles de la vitesse du vent | 82 |
| Les variations saisonnières de la vitesse du vent | 88 |
| Les variations diurnes de la vitesse du vent | 97 |

ATLAS EOLIEN DE LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Cartographie du potentiel éolien | 103 |
| Cartographie du potentiel éolien de la région Nord-Pas-de-Calais à partir du programme WAsP | 111 |

LES VENTS EXTREMES DANS LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS

| | |
|-------------------------------------------|-----|
| Les vents extrêmes | 137 |
| Les tempêtes cycloniques | 143 |
| Les coups de vent de grain | 147 |
| Les trombes | 149 |
| Les temps de retour des vents extrêmes | 151 |
| Les effets des tempêtes sur les éoliennes | 152 |

| | |
|--------------------|------------|
| CONCLUSIONS | 155 |
|--------------------|------------|

| | |
|----------------------|------------|
| BIBLIOGRAPHIE | 159 |
|----------------------|------------|

| | |
|-----------------------------|------------|
| LISTE DES TABLEAUX | 165 |
| TABLE DES GRAPHIQUES | 167 |
| TABLE DES CARTES | 168 |
| TABLE DES FIGURES | 168 |

INTRODUCTION

On présente souvent le Nord de la France comme une région où le climat est maussade, frais, peu ensoleillé et venteux. En fait, il dépend de la circulation atmosphérique, essentiellement de type océanique, qui affecte une bonne partie de l'Europe du Nord et du Nord-Ouest.

Le vent peut apparaître, au premier abord, comme un élément négatif pour le bien-être de la population. Cependant, depuis le Moyen-Age, il est utilisé dans les moulins à vent pour moudre le grain. Ces moulins ont également permis l'assèchement des Moères au XVIIe siècle. Au début du XIXe siècle, on en dénombrait environ 2000 dans la région Nord-Pas-de-Calais. Vers 1800, aux abords de Lille, une des premières "zones industrielles" s'est développée grâce aux moulins à vent; il y en avait environ 200 qui servaient à produire de l'huile. Au niveau mondial, le vent fait aujourd'hui tourner 20 000 éoliennes qui produisent plus de 5 TWh/an, sans engendrer de pollutions ni de risques technologiques majeurs. Le recours à l'énergie éolienne, tant au niveau mondial qu'au niveau européen, augmente régulièrement.

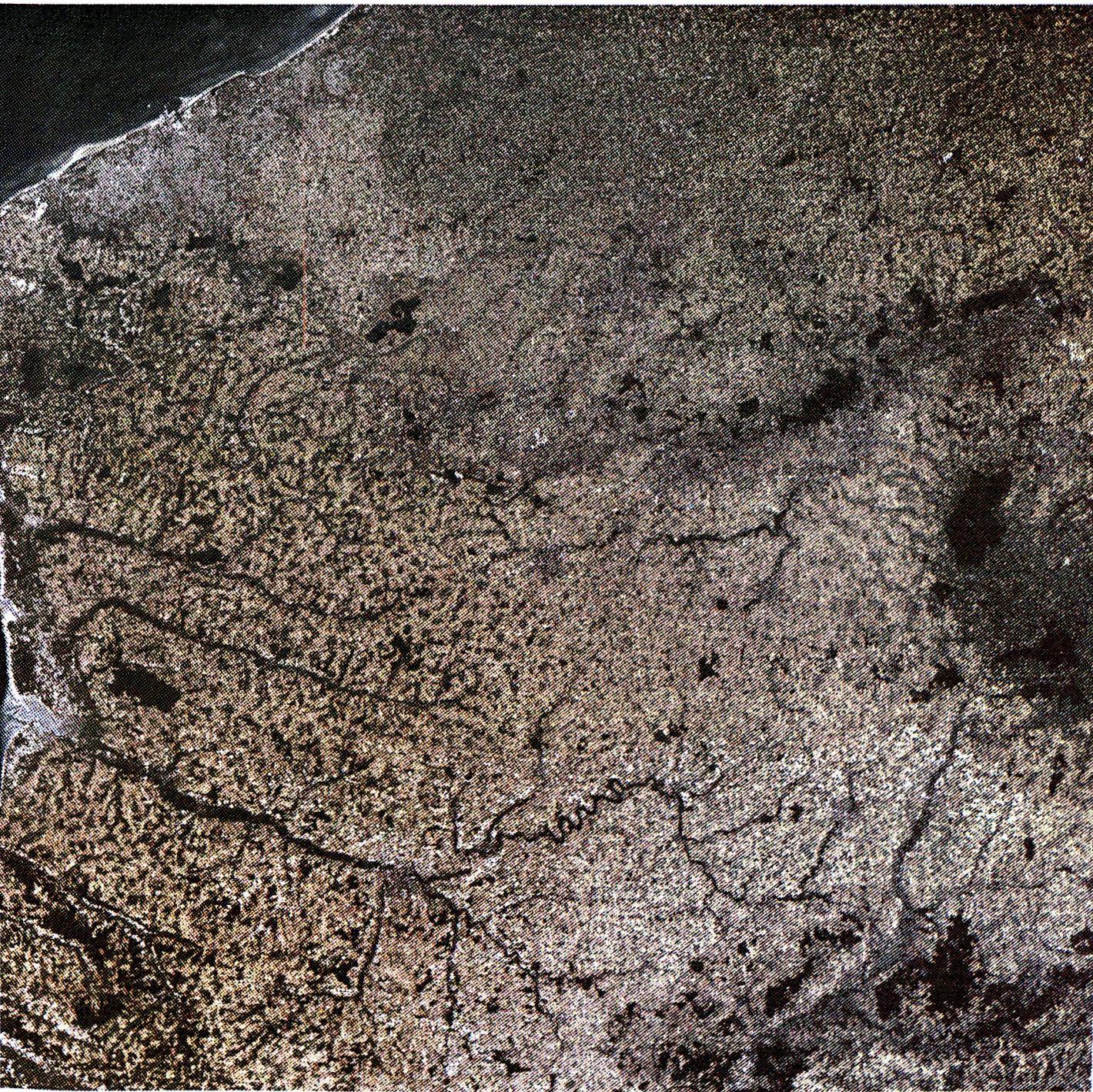
Le Nord-Pas-de-Calais apparaît donc historiquement et géographiquement comme une région favorisée pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Aussi, le but de ce travail est d'évaluer le gisement éolien de la région Nord-Pas-de-Calais.

**PRESENTATION
DE LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS**

LE NORD-PAS-DE-CALAIS : UNE GRANDE VARIETE DE REGIONS NATURELLES...

Le Nord-Pas-de-Calais est une région de transition qui appartient à la fois au Bassin Parisien (Artois) et à la grande plaine de l'Europe du Nord-Ouest (Flandre, plaines de la Lys et de la Scarpe). Il comprend plusieurs régions naturelles qui se différencient par leurs caractères topographiques, géologiques, climatiques et humains qui déterminent un type d'agriculture et de paysage qui modifient certains paramètres climatiques tels que le vent.

Le découpage utilisé ici est basé essentiellement sur des critères géologiques, topographiques et paysagers, et peut donc différer de celui d'autres auteurs; A. Gamblin (*A. Gamblin, 1984*), P. Flatrès (*P. Flatrès, 1980*). La carte de la région Nord-Pas-de-Calais présentée ci-après provient du satellite Landsat. Le cliché date du mois d'Octobre 1989. Différentes régions naturelles du Nord-Pas-de-Calais apparaissent sur ce cliché : la Plaine Maritime, le Boulonnais, les plaines de la Lys et de la Scarpe ainsi que l'Avesnois.



ANDSAT 5-TM 5 octobre 1989

canaux 1 2 3 (couleurs "naturelles")



C. Kergomard

L'Artois, vaste plateau crayeux du crétacé supérieur, d'environ 5 400 Km² s'étend de la Mer du Nord et de la Manche au Cambrésis. Avec une altitude maximale de 211 mètres au signal des Harlettes, l'Artois s'abaisse vers le Sud-Est et n'atteint plus que 90 mètres au seuil du Cambrésis. L'Artois est subdivisé en plusieurs petites régions : au Nord, les falaises du Blanc-Nez, puis vers le Sud-Est les Collines Guinoises, le Haut-Artois, le Pays de Montreuil, le Ternois, le Bas-Artois, la Gohelle. La façade occidentale de l'Artois se termine par une forte dénivellation (Mont de Dannes); le littoral est formé de massifs dunaires.

L'Artois est drainé par 3 fleuves côtiers, l'Authie, la Canche, l'Aa et par plusieurs rivières dont la Lys et la Scarpe. Les 4 premiers cours d'eau cités coulent dans des vallées assez marquées (80 à 100 mètres de dénivellation).

La barrière que constitue l'Artois, oblige l'air maritime humide à s'élever et à se condenser; aussi, c'est une région pluvieuse sur ses parties élevées : 1000 mm d'eau par an dans le Haut-Artois. La hauteur des précipitations diminue vers le Sud-Est et vers l'Est : 750 à 900 mm dans le Ternois et le Pays de Montreuil, 600 à 700 mm dans le Bas-Artois.

C'est une région faiblement peuplée, si on excepte Arras et la bordure Sud de la région minière. La densité de population avoisine les 50 habitants au Km² dans le Haut-Artois. L'Artois est une région de grande culture (céréales, betteraves, élevage, fourrages), le paysage y est du type "champ ouvert" et la forêt y occupe 6% de la surface, avec des variations locales (taux de boisement supérieur à 10% dans la partie occidentale de l'Artois, contre moins de 3% dans la partie orientale) : la pénétration du vent n'est donc pas freinée.

Les Bas-Champs, plaine maritime du quaternaire récent d'environ 50 Km², délimités par la courbe de niveau des 5 mètres, s'étendent de la Canche à l'Authie et s'intercalent entre la partie occidentale de l'Artois et la Manche dont ils sont séparés par un massif dunaire de 50 Km² culminant à 45 mètres d'altitude.

La hauteur des précipitations y est modérée : 670 mm au Touquet, 720 mm à Rang-du-Fliers.

Cette partie du littoral a une vocation touristique affirmée. Les Bas-Champs, région plate et marécageuse, sont peu peuplés, et ont un habitat dispersé. Le milieu dunaire est plus boisé (9%) que la moyenne régionale et peut expliquer en partie la faiblesse relative de la vitesse du vent à la station du Touquet.

Le Boulonnais, boutonnière argileuse du jurassique avec un petit affleurement hercynien, d'environ 550 Km², est séparé de l'Artois par une cuesta (Haut-Boulonnais) dont l'altitude varie de 130 à 206 mètres. Il est bordé par la Manche à l'Ouest et par la Mer du Nord sur sa façade septentrionale. Le littoral est formé d'une succession de dunes et falaises, dont les plus célèbres, celles du Cap Gris-Nez séparent la Manche de la Mer du Nord. Le fond de la dépression, le Bas-Boulonnais, vallonné, dépasse en plusieurs points les 100 mètres d'altitude et culmine à 189 mètres au Mont Lambert.

Le Boulonnais est arrosé par plusieurs petits fleuves côtiers, la Liane, le Wimereux et la Slack qui se jettent dans la Manche.

Les précipitations peu abondantes sur le littoral, 600 mm par an à Boulogne, s'accroissent dans l'intérieur sous l'effet de la topographie, et atteignent 900 mm. Les conditions édaphiques, climatologiques et humaines ont fait du Boulonnais une région d'élevage et un pays de bocage où le taux de boisement (13%) est supérieur à la moyenne régionale, surtout dans sa partie méridionale (forêts de Boulogne, Desvres et Hardelot). En raison du relief tourmenté, des forêts et du bocage, l'intensité du vent diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne du littoral; cependant des effets de survitesse de vent sont observés sur le sommet des collines.

La Plaine Maritime, du quaternaire récent, d'environ 800 Km², délimitée par la courbe de niveau des 5 mètres, s'étend de Sangatte à la frontière belge et s'arrête aux pieds de la forêt d'Eperlecques et du Mont de Watten. Elle est protégée de la Mer du Nord par un cordon dunaire. Cette région plate, aux multiples fossés et canaux de drainage, est arrosée par l'Aa canalisée.

Protégée par les reliefs de l'Artois, la plaine maritime est une région peu pluvieuse : 600 à 700 mm d'eau par an.

Depuis 1960, les agglomérations de Dunkerque et de Calais se sont fortement étalées et le port de Dunkerque tend à rejoindre Gravelines.

La plaine maritime est une région de cultures industrielles : betteraves, légumes, etc.; le paysage y est du type "champ ouvert"; il n'y a pratiquement aucun bois (le taux de boisement est proche de 0%) et l'habitat y est dispersé.

La Flandre Intérieure, formée de terrains argileux de l'éocène, s'étend sur 800 Km² au sud de la Plaine Maritime jusqu'à la plaine de la Lys; elle est limitée à l'Ouest par le Marais Audomarois. Les Monts de Flandre, dont les sommets (175 mètres à Cassel) sont constitués de couches sableuses du pliocène, forment la ligne de partage des eaux entre les bassins versants de l'Yser et de l'Escaut. La Flandre Intérieure est drainée au Nord par l'Yser et ses affluents et au Sud par ceux de la Lys.

Protégée par l'Artois, la Flandre Intérieure reçoit des quantités d'eaux modestes, de 600 à 700 mm par an; celles-ci augmentent sur les Monts de Flandre.

C'est une région d'élevage et de plantes sarclées, le paysage est du type "champ ouvert" avec des rideaux d'arbres, le taux de boisement est faible (aux alentours de 2%), l'habitat y est dispersé. Un effet de survitesse doit se manifester sur les Monts de Flandre; on dénombrait d'ailleurs au début du XIX^{ème} siècle 8 moulins à vent à Cassel.

Le Marais Audomarois, cuvette formée d'alluvions du quaternaire récent, d'environ 40 Km², délimité par la courbe de niveau des 5 mètres, est entouré à l'Ouest par l'Artois et à l'Est par la Flandre Intérieure.

C'est une région plate, marécageuse, drainée par l'Aa et de nombreux canaux et fossés, consacrée essentiellement au maraîchage. De nombreuses rangées

d'arbres, ainsi que l'écran formé par les collines de l'Artois diminuent la vitesse du vent.

La Plaine de la Lys, formée de terrains de l'éocène et d'alluvions du quaternaire, d'environ 600 Km², délimitée par la courbe de niveau des 20 mètres, s'étend d'Aire-sur-la-Lys à Comines sur une largeur d'une vingtaine de kilomètres.

Cette région plate est drainée par la Lys, ses affluents et par de nombreux fossés. La Plaine de la Lys est une région peu pluvieuse, elle reçoit entre 600 et 700 mm d'eau par an.

Assez peuplée, c'est une région agricole productrice de légumes. Des rangées d'arbres, la présence d'une grande forêt (forêt de Nieppe), et un habitat dispersé en forment les principales caractéristiques paysagères.

Le Ferrain, le Baroeul et la Weppes, petites régions naturelles d'environ 350 Km² sont formées de terrains de l'éocène et sont relativement plates. Le Ferrain est situé entre la Lys et la Deûle; le Mont d'Halluin (69 mètres) en est le sommet. La Weppes, située à l'ouest de la Deûle atteint 49 mètres à Capinghem, tandis que le Baroeul s'étend au nord de Lille. Ces petites régions sont drainées par la Lys, la Deûle et la Marque.

Les précipitations sont modérées, de l'ordre de 600 à 700 mm par an.

L'agglomération lilloise s'est fortement étalée depuis quelques décennies et les communes rurales proches s'urbanisent. Le paysage change sans cesse, les caractéristiques du vent aussi, sous l'influence de l'urbanisation croissante.

Le Carembault et le Mélantois, bas plateaux crayeux du crétacé supérieur d'environ 250 Km², s'étendent du Nord-Est de l'Artois à la frontière belge, en passant par le Sud de l'agglomération lilloise. Le Mélantois forme un dôme atteignant 58 mètres à Faches-Thumesnil. Le réseau hydrographique est peu important : quelques petits affluents de la Deûle et de la Marque.

La pluviométrie est modérée, 600 à 700 mm d'eau par an.

C'est une région de grande culture, au paysage du type "champ ouvert", peu boisé et à habitat groupé. Comme en Artois, les obstacles à la pénétration du vent sont peu nombreux, hormis l'agglomération lilloise.

La Pévèle, région argileuse de l'éocène, d'environ 350 Km², est limitée au Nord par le Mélantois, à l'Ouest par le Carembault et l'Artois et au Sud par la plaine de la Scarpe. Région faiblement vallonnée, elle atteint 107 mètres à Mons-en-Pévèle.

C'est une région plus humide que ses voisines, elle reçoit 700 mm d'eau par an.

Depuis deux décennies, la Pévèle se rurbanise. C'est une région de culture intensive de légumes, très verte par ses rangées d'arbres, ses haies et ses bois (le taux de boisement est de 9%), surtout dans sa partie Nord. L'habitat y est dispersé. Dans la Pévèle, la végétation freine le vent.

La Plaine de la Scarpe, formée de terrains de l'éocène et d'alluvions du quaternaire, d'environ 250 Km², délimitée par la courbe de niveau des 20 mètres, s'étend de Douai à la frontière belge. Cette région plate est drainée par la Scarpe, ses affluents et par de nombreux fossés.

C'est une région peu pluvieuse, elle reçoit de 600 à 700 mm d'eau par an.

De nombreuses rangées d'arbres, un taux de boisement non négligeable (15%), la présence de la région minière sur sa façade Sud sont les principales caractéristiques paysagères.

Le Valenciennois, formé de terrains crayeux recouverts partiellement de dépôts de l'éocène, s'étend sur environ 500 Km², de la vallée de l'Escaut au Quesnoy. Le Valenciennois s'élève régulièrement vers le Sud-Est et atteint 120 mètres d'altitude au contact de l'Avesnois. Le Valenciennois est drainé par l'Escaut et ses affluents, l'Hogneau, l'Aunelle, la Rhonelle, l'Ecaillon.

La pluviométrie y est modérée, aux alentours de 700 mm d'eau par an.

L'agriculture est intensive, le paysage de type "champ ouvert" et l'habitat est groupé. Le taux de boisement est de 10% dans la partie basse du Valenciennois (plaine de l'Escaut) et seulement de 1% ailleurs.

Le Cambrésis et l'Ostrevant, plateaux crayeux du crétacé supérieur, partiellement recouverts au sud du Cambrésis par des dépôts de l'éocène, d'environ 1 150 Km², ne se distinguent pas, géologiquement parlant, de l'Artois. Le Cambrésis correspond à l'arrondissement de Cambrai, et l'Ostrevant à la partie Sud de celui de Douai.

Moyennement vallonné, le Cambrésis s'élève vers le Sud et atteint 165 mètres à Busigny. Le seuil du Cambrésis (90 mètres) permet le passage du canal de St-Quentin; à partir de ce point, les terrains s'élèvent vers l'Est. Le Cambrésis est drainé par l'Escaut et ses affluents, la Sensée, la Selle, l'Erclin, le Torrent d'Esnes.

Ce sont des régions peu pluvieuses, 650 à 750 mm d'eau par an, cependant la pluviométrie augmente vers l'Est.

L'agriculture est intensive dans ces deux régions : plantes sarclées, céréales, chicons ("endives") et élevage. Le paysage y est du type "champ ouvert", le taux de boisement est faible (3%) mais tend à augmenter vers le Sud et le Sud-Est où il atteint 5% dans les cantons de Clary et du Cateau; l'habitat y est groupé.

Le vent n'est pas freiné par les obstacles végétaux; des effets de survitesses doivent être observés sur les sommets.

L'Avesnois est formé de terrains du dinantien et du dévonien ainsi que de terrains crétacés partiellement recouverts de dépôts de l'éocène sur sa partie occidentale. Les terrains de l'ère primaire constituent la partie occidentale du massif ardennais. D'une surface d'environ 1 350 Km², l'Avesnois correspond à la

majeure partie de l'arrondissement d'Avesnes-sur-Helpe. Assez vallonné, il s'élève vers le Sud-Est jusqu'à 170 mètres dans la forêt de Mormal, puis descend à 130-140 mètres dans la vallée de la Sambre, puis remonte vers le Sud-Est à 271 mètres à Anor. L'Avesnois est drainé à l'Ouest par les affluents de l'Escaut (Hogneau, Aunelle, Rhonelle, Ecaillon) et par la Sambre et ses affluents (Rivierette, Helpe Mineure et Majeure, Solre, Thure, Hantes).

Par l'effet de la topographie, la pluviométrie augmente; les précipitations sont de l'ordre de 800 à 900 mm par an.

L'Avesnois est une région d'élevage, d'arbres fruitiers. Le bocage et le boisement important (18%), l'habitat dispersé en sont les principales caractéristiques paysagères. Dans les cantons de Bavay et de Maubeuge-Nord, le paysage est plus ouvert et le boisement moins important.

Du fait de l'éloignement des mers, du bocage et des forêts, l'intensité du vent y est plus faible que dans les autres régions naturelles.

PRESENTATION DES ASPECTS CLIMATIQUES DU NORD DE LA FRANCE

Le climat du Nord de la France dépend de la circulation atmosphérique, essentiellement de type océanique, qui affecte une bonne partie de l'Europe du Nord et du Nord-Ouest. Le climat du Nord de la France, tempéré et océanique, subit également cependant l'influence de la latitude.

LA TEMPERATURE

Les températures moyennes annuelles, 9°7 à Lesquin et 10°4 à Dunkerque, pour la période 1951-1980 (*Ministère des Transports, Direction de la météorologie, 1983*), sont légèrement moins élevées que celles de la région parisienne (10°7 à Orly) ou de la Bretagne (10°8 à Brest-Guipavas). Ces valeurs, relativement peu élevées, s'expliquent essentiellement par la latitude et non par un effet de continentalité, car toute la région est soumise en même temps aux mêmes flux.

En annexe, page 2, on trouvera un graphique représentant le régime thermométrique moyen de plusieurs stations.

Malgré un relief modéré, celui-ci peut influencer et modifier les valeurs : les températures sont plus faibles en Avesnois et sur le plateau de l'Artois. Les températures moyennes sont plus élevées sur le littoral qu'à l'intérieur des terres, l'inertie thermique de la mer en est responsable. Pour P. Biays (*P. Biays et coll., 1968*), les températures présentent deux traits associés, la modération et l'instabilité.

On trouvera en annexe à la page 2 un graphique représentant les variations des températures moyennes au Touquet.

La température du mois le plus froid, Janvier, 2°7 à Lesquin contre 4° à Boulogne et 4°1 à Dunkerque, est très inférieure à celle des stations bretonnes (6°2 à Brest-Guipavas), à peine inférieure à celle de la région parisienne (3°1 à Orly) mais supérieure à celle de l'Est de la France (0°8 à Strasbourg). Les hivers sont parfois rigoureux (-5°2 en Février 1956, -4°8 en Janvier 1963 à Lesquin), ils sont dus, dans ce cas, à des flux d'Est, de Nord-Est ou à des anticyclones continentaux dont le centre d'action se situe en Scandinavie. Cependant, les températures minimales ne sont pas descendues en-dessous de -20° durant la période 1951-1980. Le plus souvent, les hivers ne sont pas très rigoureux et correspondent à des circulations zonales d'Ouest et de Sud-Ouest, mais ils sont assez longs. Ainsi la moyenne hivernale n'est que de 3°2 à Lesquin, l'écart entre les moyennes des trois mois d'hiver est faible (1°).

En annexe, page 3, le graphique 3 représente la variabilité des températures hivernales à Lesquin.

C'est en hiver que les différences de température sont les plus marquées entre le littoral et l'intérieur ($1^{\circ}4$ de plus à Dunkerque par rapport à Lesquin). Sur le littoral, les valeurs des minima absolus sont moins marquées qu'à l'intérieur des terres. Ainsi en Février 1956, on a observé $-17^{\circ}8$ à Lesquin contre $-12^{\circ}8$ à Dunkerque et $-13^{\circ}6$ à Boulogne.

Durant le printemps, les différences entre le littoral et l'intérieur diminuent fortement : $8^{\circ}9$ à Dunkerque comme à Lesquin. Les invasions d'air polaire (flux de Nord) sont responsables des chutes de neige et des périodes de refroidissement durant cette saison.

En été, les températures moyennes ne sont pas très élevées, avec un maximum pour le mois d'Août proche de 17° . La différence entre les moyennes d'Août et de Juillet est plus marquée sur le littoral qu'à l'intérieur : $0^{\circ}5$ à Boulogne, $0^{\circ}4$ à Dunkerque contre $0^{\circ}1$ à Lesquin. A Lesquin, la valeur d'Août est supérieure à celle de Juillet dans 14 cas sur 30, tandis qu'à Dunkerque et Boulogne cela se produit dans 18 et 16 cas sur 23. La température moyenne du mois d'Août dans le Nord est supérieure d'environ 1° à celle des stations bretonnes maritimes, mais inférieure de $1^{\circ}5$ à celle de la région parisienne ou de près de 2° à celle de l'Alsace. Les grandes chaleurs sont rares et les températures maximales dépassent exceptionnellement les 35° à l'intérieur du pays ($36^{\circ}5$ à Epinoy en Juillet 1959). Les moyennes estivales varient d'une année à l'autre. Ainsi à l'été chaud (19°) et ensoleillé de 1976 a succédé un été maussade et frais ($15^{\circ}6$ en 1977).

Le graphique 4, en annexe à la page 3, représente la variabilité des températures estivales à Dunkerque.

En automne, la différence de température entre le littoral et l'intérieur augmente et atteint $1^{\circ}2$ à $1^{\circ}4$. Les températures moyennes diminuent rapidement d'Octobre à Novembre; la diminution de la durée du jour en est responsable. Octobre est plus chaud qu'Avril dans 27 cas sur 30 ($10^{\circ}8$ en Octobre à Lesquin contre $8^{\circ}5$ en Avril), ceci montre que l'influence maritime se manifeste encore à Lille.

Concernant la différence entre le mois le plus froid et le mois le plus chaud, on observe aussi une différence entre le littoral et l'intérieur : $14^{\circ}2$ à Lesquin contre $12^{\circ}6$ à Boulogne et $13^{\circ}1$ à Dunkerque. Ces valeurs sont plus élevées qu'en Bretagne ($9^{\circ}9$ à Brest) mais moins qu'en région parisienne ($15^{\circ}5$ à Orly) ou qu'en Alsace ($18^{\circ}1$ à Strasbourg). Ces valeurs moyennement élevées sont caractéristiques d'un domaine climatique océanique dégradé.

Le nombre de jours avec gelée sous abri, 58 à Lesquin est à peine supérieur à celui observé dans la région parisienne (50 à Orly), mais est bien inférieur à celui de l'est du pays (79 à Strasbourg). On compte deux fois plus de jours de gel à Dunkerque et Boulogne qu'en Bretagne littorale (32 contre 17). Concernant la région Nord-Pas-de-Calais, on retrouve l'opposition littoral-intérieur du pays.

LES PRECIPITATIONS

L'un des traits essentiels du climat du Nord est la pluviosité. Les précipitations sont inégalement réparties; les parties basses (Plaine Maritime, Flandre intérieure, Pévèle, Mélandois, Bas-Artois, Douaisis, Bas-Hainaut) reçoivent entre 600 et 700 mm d'eau par an, tandis que les parties hautes (Artois, Avesnois) en reçoivent entre 800 et 1000 mm chaque année. Les reliefs du Boulonnais et de l'Artois, pourtant modestes, obligent l'air d'origine maritime à s'élever ce qui provoque les précipitations. La région, proche des dépressions des Iles Britanniques, subit les flux d'Ouest et de Sud-Ouest qui sont en général accompagnés d'importantes zones nuageuses. Aussi le nombre de jours avec précipitations supérieures à 0.1 mm est compris entre 168 à Dunkerque et 177 à Lesquin, soit presque un jour sur deux.

En annexe, page 4, on trouvera une carte des précipitations annuelles dressée par la Météorologie Nationale à partir de la méthode AURELHY, Analyse Utilisant le RELief pour l'HYdrométéorologie, (*Ministère des Transports, Direction de la Météorologie, 1988*) pour la période 1951-1980.

Un des autres caractères des précipitations dans le Nord réside dans la variabilité interannuelle qui est liée aux variations de la circulation atmosphérique. Les valeurs annuelles varient entre 416 mm en 1959 et 899 mm en 1974 à Lesquin, entre 377 mm en 1976 et 830 mm en 1974 à Epinoy, de 427 mm en 1955 et 854 mm en 1966 à Dunkerque et de 542 mm en 1953 et 1069 mm à Fiefs. Les valeurs fluctuent de 30 à 45% autour de la valeur moyenne.

En annexe, page 5, le graphique 5 présente la variabilité interannuelle des précipitations à Frévent pour la période 1951-1977.

Le mois, qui est en moyenne, le plus arrosé est celui de Novembre. Cependant, si l'on étudie la fréquence, on observe qu'à Lesquin, le mois de Novembre n'a été que 2 fois, sur 30 années, le mois le plus arrosé de l'année; tandis qu'à Frévent, il l'a été 6 fois sur 29. Le minimum pluviométrique se situe au début du printemps. Pour les 20 stations pour lesquelles nous avons des relevés portant sur la période 1951-1980, nous avons calculé le régime saisonnier. La saison la plus arrosée est l'automne sur le littoral et l'Artois (13 cas sur 28 à Frévent) et l'été dans la région lilloise (14 cas sur 30 à Lesquin), le Hainaut et le Cambrésis. La saison la moins arrosée est le printemps (12 cas sur 30 à Lesquin et 13 cas sur 28 à Frévent), sauf dans une partie du Hainaut. L'étude de la répartition géographique des régimes saisonniers moyens nous montre que la formule *AHEP* (Automne-Hiver-Eté-Printemps), à caractère maritime est présente sur tout le littoral et une partie de l'Artois. A l'Est de cette zone on trouve plusieurs stations *AEHP*, qui selon P.Biays (*P. Biays et coll., 1968*) dérivent du régime *AHEP* avec un hiver et un été qui ont des valeurs peu différentes mais avec un ordre inversé par rapport au régime *AHEP*. Les régimes *EAHP* et *EAPH*, à été prédominant sont situés sur les 2/3 sud du département du Nord. Pour P.Biays (*P. Biays et coll., 1968*), la continentalité s'exprime par la place de l'été et de l'hiver. Cependant la seconde position de l'automne, qui, en valeur, n'est jamais éloignée de l'été, montre que l'influence maritime est encore bien présente.

En annexe, page 5, le tableau 1 a été dressé à partir des informations contenues dans le Résumé Mensuel du Temps (RMT) édité par la Météorologie Nationale et le fascicule 2 des normales climatologiques 1951-1980 (*Ministère des Transports, Direction de la Météorologie, 1986*). Ce dernier donne des renseignements sur les normales saisonnières et le régime pluviométrique de plusieurs stations.

Les formules moyennes des régimes pluviométriques cachent en fait une grande variabilité. Si on étudie les fréquences, on remarque qu'à Lesquin le régime moyen, *EAHP*, ne s'est produit que 3 fois sur les 30 années. A Frévent, le régime moyen, *AHEP*, ne s'est produit que 3 fois sur 28 ans. On trouve pour chaque station 15 à 16 régimes différents; chacun de ceux-ci n'est représenté que 1 à 4 fois durant la période 1951-1980.

Face à cette variabilité, il est intéressant d'étudier l'ordre d'apparition des saisons. Ainsi, l'été est en première position à Epinoy 10 fois sur 24, 14 fois sur 30 à Lesquin, tandis qu'à Frévent c'est l'automne qui est le plus souvent en tête avec 13 cas observés sur 28. Le printemps arrive en dernière position à Frévent, 13 fois sur 28 et 12 fois sur 30 à Lesquin.

Les hauteurs maximales d'eau tombées en 24 heures approchent ou dépassent les 50 mm : 46.1 mm à Dunkerque, 50.7 mm à Lesquin, 56.3 mm au Touquet, 70.7 mm à Rang-du-Fliers, 76.2 mm à Lille et 91.0 mm à Béthune en Juin 1951.

Avec 10.5 jours de chute de neige à Dunkerque, 12.6 à Boulogne, 19.4 à Lesquin, la neige est un phénomène mineur pour la région Nord-Pas-de-Calais. Là aussi, on observe l'opposition littoral-intérieur. Cependant, l'amoncellement de la neige dans le Boulonnais peut devenir un obstacle aux communications. Concernant la neige, on se reportera aux travaux effectués par C. Kergomard (*C. Kergomard, 1973 et 1974*).

LES AUTRES ELEMENTS DU CLIMAT

Le niveau kéraunique est faible dans la région Nord-Pas-de-Calais, de 8 à 20 jours avec orage par an. Pour plus de la moitié du territoire français, le niveau kéraunique est supérieur à 20 jours par an (*F. Roux, 1991*). Le contraste littoral-intérieur est bien marqué : 8.1 jours avec orage à Dunkerque, 10.1 à Boulogne contre 20 à Lesquin. Ceux-ci surviennent principalement de mai à septembre avec un maximum en Juillet-Août et un minimum en hiver.

Le **brouillard** est un des caractères climatiques du Nord qu'il partage d'ailleurs avec le quart Nord-Est du pays. Le contraste littoral-intérieur est toujours aussi marqué : 80 jours avec brouillard à Lesquin, contre 30 sur le littoral. G. Petit-Renaud (*G. Petit-Renaud, 1974*) a montré que le brouillard (visibilité inférieure à un kilomètre) ne gêne la visibilité que pendant 6% du temps et se produit surtout la nuit.

Avec 1557 heures annuelles à Lesquin, la durée d'insolation est une des plus faibles de France. Elle s'explique par une nébulosité importante et par la latitude. Les données partielles du Touquet montrent que l'ensoleillement est légèrement plus important sur le littoral. Le mois le plus ensoleillé, en moyenne, est Juin avec 208 heures à Lesquin, tandis que Décembre est le mois le moins ensoleillé avec 42 heures. Dans l'étude des fréquences, on remarque que dans 14 cas sur 27, Juin a été le mois le plus ensoleillé de l'année, tandis que dans 13 cas sur 27, Décembre a été le mois le moins ensoleillé.

La variabilité interannuelle (de 1321 heures en 1968 à Lesquin à 2011 heures en 1959) est cependant plus faible que dans le domaine des précipitations : les valeurs fluctuent de 15 à 30% autour de la valeur moyenne.

En annexe, page 6, le graphique 6 illustre la variabilité de la durée annuelle de l'insolation à Lesquin.

Cette rapide synthèse climatologique montre que le Nord de la France a un climat de type océanique dégradé où les oppositions littoral-intérieur sont observables sauf dans le cas des précipitations où le contraste se situe davantage dans l'opposition haut-pays/bas-pays.

Les ouvrages et articles de G. Petit-Renaud (*G. Petit-Renaud, 1973 et 1974*) et de P. Biays (*P. Biays et coll., 1968*) permettent d'approfondir les connaissances en ce domaine.

**LE VENT
DANS LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS**

LE VENT

Dans tous les ouvrages abordant la météorologie et la climatologie, on trouve la définition du vent. Nous en donnons, ici, les traits essentiels. Pour approfondir le sujet on se référera à l'ouvrage de Triplet, Roche (*J.P. Triplet, G. Roche, 1971*).

Le vent est le vecteur qui représente à tout instant le mouvement de l'air. Le mouvement de l'air fait intervenir 4 forces : la force de pression, la force de Coriolis, la pesanteur et la force de frottement.

La force de frottement n'est importante que dans la partie la plus basse de l'atmosphère, appelée couche limite planétaire (CLP). Son épaisseur est variable dans le temps et l'espace.

Au-dessus de la CLP se trouve le vent géostrophique. Il n'est pas affecté par les forces de frottement, et sa vitesse dépend essentiellement du gradient de pression; sa direction est parallèle aux isobares. Sa vitesse et sa direction sont connues grâce aux sondages qui sont effectués 1 ou 2 fois par jour, voir le graphique, situé en annexe page 7, représentant le profil vertical de la vitesse du vent à Uccle sur une épaisseur de 12 kilomètres. Pour notre région, la vitesse moyenne du vent géostrophique est d'environ 10 à 10.5 m/s (*E. Petersen, I. Troen, 1988*). En annexe page 7, la carte 2 représente la vitesse moyenne du vent géostrophique.

Dans la CLP, d'environ 1000 mètres d'épaisseur, on distingue 3 couches :

La couche turbulente hétérogène où l'écoulement de l'air est assuré par des mouvements turbulents hétérogènes. Ceux-ci dépendent essentiellement des caractéristiques du site étudié. On quantifie ces caractéristiques par la longueur de rugosité, z_0 , exprimée en mètre. En annexe, page 8 sont présentées les longueurs de rugosité de différents types de terrain. Il faut mesurer la vitesse du vent au-dessus de la limite supérieure de cette couche pour que les valeurs de la vitesse du vent ne dépendent pas exclusivement de la rugosité. La limite supérieure est généralement estimée à 20 fois la longueur de rugosité du site (*L.M. Malet, 1989*), soit 8 mètres si on se trouve dans un site de banlieue (20 fois 0.4 mètre). Les mesures sont généralement faites à 10 mètres au-dessus du sol, et sont donc réalisées au-dessus de cette couche turbulente.

La couche limite de surface (CLS), de quelques mètres à environ 100 mètres au-dessus du sol. Les mouvements turbulents provoquent le brassage de l'air et donc l'homogénéisation des caractéristiques thermiques et cinématiques. La vitesse moyenne du vent augmente avec la hauteur en fonction de la stratification thermique de l'air. La vitesse du vent dépend encore de l'environnement (rugosité) du site.

La couche d'Ekman, de 100 à environ 1000 mètres au-dessus du sol. Progressivement, la force de frottement diminue et la vitesse augmente avec la hauteur.

On se référera au cours de G. De Moor (*G. De Moor, 1983*) pour compléter les connaissances dans le domaine de la couche limite planétaire.

Dans la CLS, le profil vertical de la vitesse moyenne du vent est une loi logarithmique qui dépend de la stabilité de l'air.

- Si la température potentielle moyenne ne varie pas avec l'altitude (gradient adiabatique), l'équilibre est neutre.
- Si la température potentielle moyenne diminue avec l'altitude (gradient sur adiabatique), l'équilibre est dit instable. Le milieu est le siège de mouvements turbulents intenses pouvant se superposer à la turbulence d'origine dynamique.
- Si la température potentielle moyenne augmente avec l'altitude (gradient sous-adiabatique ou inversion), l'équilibre est stable. La turbulence éventuelle d'origine dynamique se trouve inhibée par l'effet de la flottabilité.

La température potentielle est la température de l'air ramené du niveau observé jusqu'à une pression de 1000 hPa. Adiabatique se dit d'un processus thermodynamique pendant lequel il n'y a pas d'échange de chaleur entre le système considéré et l'extérieur.

L'équilibre instable se rencontre fréquemment au cours de la journée, surtout quand l'ensoleillement est important, tandis que la stabilité de l'air se produit surtout au cours de la nuit. Quand l'équilibre est stable, le vent est faible au voisinage du sol, mais on observe un maximum très marqué au sommet de l'inversion de température : il s'agit d'un jet de basse couche.

Calcul de la vitesse moyenne $u(z_2)$ à la hauteur z_2 à partir de la valeur $u(z_1)$ mesurée à la hauteur z_1 :

masse d'air en état
d'équilibre thermique
neutre

$$u(z_2) = u(z_1) \ln(z_2/z_0) / \ln(z_1/z_0) \quad (1)$$

masse d'air en état
d'équilibre thermique
instable

$$u(z_2) = u(z_1) \ln(z_2/z_0) - w / \ln(z_1/z_0) - w \quad (2)$$

avec $w = 2 \ln(1+x)/2 + \ln(1+x^2)/2 - 2 \arctg(x + \pi/2)$

et $x = \phi^{-1}(z/L)$

masse d'air en état d'équilibre thermique stable

$$u(z_2) = u(z_1) \left(\ln(z_2/z_0) + 4.7 z_2/L \right) / \left(\ln(z_1/z_0) + 4.7 z_1/L \right) \quad (3)$$

avec z_0 la longueur de rugosité du site.

Pour les équations (2) et (3), il faut évaluer L (longueur de Monin-Obukov) qui dépend de la stabilité de l'air, donc du gradient thermique et du rayonnement. Aucun sondage n'est réalisé dans la région Nord-Pas-de-Calais. Les sondages les plus proches sont effectués à Uccle près de Bruxelles, à Trappes près de Paris et dans la région londonienne. Les sondages d'Uccle ne sont pas utilisables car ils sont réalisés dans un site urbain et il y a très peu d'informations sur la basse atmosphère. Quant aux autres sondages, ils sont trop éloignés de la région Nord-Pas-de-Calais pour être utilisés. Quand la structure thermique de l'atmosphère n'est pas connue, ce qui est le cas dans la région Nord-Pas-de-Calais, et si les niveaux z_1 et z_2 sont proches (moins de 25 mètres), alors on peut utiliser la loi logarithmique (1) (*L.M. Malet, 1989*). On peut aussi recalculer L , à l'aide d'une méthode empirique basée sur l'emploi des classes de stabilité de Pasquill-Gifford (*C.G. Justus, 1980*). Les classes de stabilité sont déterminées à l'aide de paramètres simples mesurés dans un certain nombre de stations synoptiques : insolation, nébulosité et vitesse du vent.

Dans la CLS, on ne peut étudier et interpréter correctement les valeurs de la vitesse moyenne du vent que si l'on connaît l'environnement du site où sont faites les mesures. A 10 mètres au-dessus du sol, la vitesse du vent dépend de la rugosité du site, des obstacles proches et du relief. Il faut donc déterminer le plus finement possible pour chaque direction, les différentes longueurs et changements de rugosité, et décrire les obstacles dans un rayon maximum de 1500 mètres autour du pylône anémométrique.

Il faut aussi décrire la topographie du site dans un rayon de quelques kilomètres. Si l'anémomètre se trouve sur le sommet d'une colline, même si elle est modérée, on observera un effet de survitesse.

Certains auteurs (*L.M. Malet, 1989* et *C.G. Justus, 1980*) estiment la vitesse du vent au sommet de la colline $u_s(z)$ par :

$$u_s(z) = u(z) \times S(z)$$

$$\text{avec } S(z) = 1 + a(z) H/p \quad \text{et } a(z) = (3.8 - .13 \ln p/z_0) e^{-3z/p}$$

$u(z)$ est la vitesse mesurée en plaine en amont de la colline, H est la hauteur de la colline, p la longueur du versant c'est-à-dire la projection horizontale, z_0 la rugosité du site, z la hauteur à laquelle le vent est mesuré, 10 mètres en général. Les relations sont valables si :

$$100z_0 \leq H < p/4 \leq 400 \text{ et } 1000 \leq p/z_0 \leq 100\,000$$

La zone de survitesse s'étend sur une distance H de part et d'autre du sommet de l'obstacle. Sur le versant sous le vent, on observe une diminution de la vitesse.

L'étude de la colline d'Askervein située dans l'île de South Uist (Ecosse), en 1983 et 1985, a permis de mieux connaître l'écoulement du vent autour et sur les collines, voir annexe page 9 (*I. Troen, E. Petersen, 1988*). A cette occasion, le BZ model a été mis au point. Il est maintenant utilisé dans le logiciel WAsP, Wind Atlas Analysis and Application Programme (*I. Troen, E. Petersen, 1988, E. Petersen, I. Troen, N. Mortensen, 1988, S.M. Barton, R.S. Hunter, 1988 et I. Troen, E. Petersen, 1991*) développé par le département de la Météorologie et de l'énergie éolienne du Laboratoire National de Risoe au Danemark.

Le coefficient de survitesse dS à 10 mètres au-dessus du sol est estimé par la formule suivante :

$$dS = 2h/L$$

avec h , la hauteur de la colline et L , la longueur caractéristique de la colline, définie comme la demi-largeur.

La hauteur à laquelle se produit le maximum de survitesse relative, l , est estimée par la formule :

$$l = 0.3 z_0 (L/z_0)^{0.67}$$

avec z_0 , la longueur de rugosité du site.

Un exemple de calcul se trouve en annexe à la page 10.

LES STATIONS METEOROLOGIQUES DE LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS

Plusieurs organismes mesurent la vitesse et la direction du vent dans la région Nord-Pas-de-Calais. Il s'agit de Météo-France (ex Météorologie Nationale), du Ministère de l'Industrie, d'EDF et des aérodromes. Certains d'entre eux enregistrent les données et publient régulièrement les résultats dans des feuilles mensuelles; d'autres, comme les aérodromes, n'enregistrent pas les données.

LES DIFFERENTS TYPES DE DONNEES

Météo-France publie, pour toutes ses stations ainsi que pour celles d'EDF, un tableau climatologique mensuel (en abrégé TCM) dans lequel on trouve les données concernant les températures, les précipitations, l'insolation, le vent, la pression de l'air, l'humidité, les météores.

Sur la feuille du TCM concernant le vent, on trouve les données trihoraires de vitesse et de direction du vent (00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h et 21h TU) moyennées sur 10 minutes. On trouve aussi des renseignements sur la vitesse, la direction qui lui est associée et l'heure à laquelle s'est produit le vent maximal quotidien. Les vitesses de vent ont été arrondies à l'unité la plus proche. Ainsi, la valeur 3 m/s correspond à l'ensemble des valeurs de l'intervalle 2.5 à 3.4 m/s. Les calmes correspondent aux valeurs comprises entre 0 et 0.4 m/s. Les directions ont été arrondies à 20 ° près : la direction 28 correspond à l'ensemble des valeurs comprises entre 270 et 289 °. Par la suite, la précision des mesures sur les documents s'est améliorée, puisqu'elle est maintenant de 10°.

En annexe, à la page 11, on trouvera un exemple de la feuille de vent d'un TCM.

Certaines stations météorologiques enregistrent les variations de la vitesse et de la direction du vent, moyennées sur 2 minutes ou instantanées. Dans un travail précédent (*F. Paul, G. Petit-Renaud, 1984*), il a été montré que les données moyennées sur 10 minutes du TCM étaient suffisamment précises pour pouvoir les utiliser dans un travail statistique. En annexe, page 12, le tableau 3 présente et compare les données trihoraires des TCM et les diagrammes de vitesse de vent. L'étude des diagrammes de la vitesse et de la direction du vent moyennées sur 2 minutes est plus délicate et demande plus de temps.

DENSITE DU RESEAU DE MESURES

La densité du réseau de mesures de vent a été faible jusqu'en 1986, où le vent n'était mesuré que dans 5 stations synoptiques de la Météorologie Nationale (Dunkerque, Boulogne, Le Touquet, Epinoy et Lesquin) ainsi qu'à Gravelines et au Cap Gris-Nez, soit une densité de 0.6 anémomètres par 1 000 Km².

A partir de 1986, la Météorologie Nationale a défini une stratégie d'implantation de stations automatiques dans les régions Nord-Pas-de-Calais et Picardie. Cette politique a permis de combler en partie les vides et d'améliorer l'assistance météorologique en temps réel aux usagers.

Cette politique a permis d'augmenter sensiblement les points de mesures de température et surtout de vent. La densité anémométrique a doublé en 3 ans et atteignait 1.2 anémomètres/1 000 Km² en janvier 1989.

Le nombre de pluviomètres étant déjà assez élevé, l'ajout de quelques points de mesures supplémentaires n'a pas accru de façon sensible la densité du réseau pluviométrique.

La densité est très variable d'une région naturelle à l'autre. Pour les régions d'une superficie supérieure à 500 Km², la densité est supérieure à 2 anémomètres/1 000 Km² : c'est le cas notamment du Boulonnais et des petites régions naturelles de l'arrondissement de Lille. Avec une seule station, la Flandre Intérieure a une densité comparable à celle de la région Nord-Pas-de-Calais, tandis que celle de l'Artois est légèrement inférieure à la moyenne régionale. Cependant en 1989, 2 nouvelles stations automatiques ont été implantées en Artois : Desvres (en réalité la station est implantée à Doudeauville) et Croix-en-Ternois. Il n'y a aucune station automatique dans les plaines de la Lys et de la Scarpe, le Cambrésis, l'Ostrevant et l'Avesnois, c'est à dire sur plus d'un quart du territoire régional.

On trouvera en annexe à la page 13, le tableau 4 qui présente la densité anémométrique des différentes régions naturelles.

Météo-France a prévu d'implanter de nouvelles stations automatiques à Guines, Lillers (Artois), Eringhem (Flandre Intérieure), Merville (Plaine de la Lys), Comines (Arrondissement de Lille), Douai (Ostrevant), Le Cateau (Cambrésis), Trélon et Elesmes (Avesnois). Pour l'instant, en 1994, ces projets sont retardés pour des raisons financières.

PRESENTATION DES STATIONS METEOROLOGIQUES

Les 5 stations synoptiques ont été implantées pour satisfaire les besoins de l'aviation civile (Lesquin et Le Touquet), de l'aviation militaire (Epinoy) et de la navigation maritime (Dunkerque et Boulogne).

Les stations automatiques ont été créées pour répondre aux besoins des agriculteurs et de la circulation automobile. En raison de l'absence de personnel, elles ont été, en général, implantées à proximité des locaux de CRS, de bâtiments agricoles ou dans des zones industrielles afin qu'une surveillance passive empêche les actes de vandalisme.

On trouvera ci-dessous une carte présentant la localisation des stations anémométriques de la région Nord-Pas-de-Calais. Les annexes aux pages 14 à 19 présentent les photographies des postes anémométriques, aux pages 20 à 35, les cartes au 1/25 000 où sont localisés les emplacements des pylônes anémométriques. En annexe à la page 36, un tableau précise la position géographique des stations mesurant le vent, en longitude et latitude et en coordonnées Lambert I et II étendu.



Carte 1 : Localisation des stations météorologiques de la région Nord-Pas-de-Calais.

La station météorologique de **Dunkerque**, en raison de sa situation géographique et de sa localisation, est représentative des conditions de vent régnant en mer, au moins pour les directions Ouest, Nord-Ouest, Nord et Nord-Est; pour les autres directions, il faut tenir compte de la rugosité apportée par les installations portuaires, les usines et l'agglomération dunkerquoise.

La station météorologique de **Boulogne** est située sur une falaise ; on y observe donc un effet de survitesse pour les vents provenant de la mer, effet qui est quelque peu atténué par la végétation et l'agglomération boulonnaise. Les vents provenant des secteurs Nord, Nord-Est et Est sont affaiblis par le relief et l'agglomération.

La station météorologique du **Touquet**, située à 2 kilomètres de la Manche, est très protégée des vents soufflant des secteurs Sud-Ouest et Ouest par le massif dunaire boisé; aussi, sa vitesse moyenne est beaucoup plus faible que sa situation quasi littorale ne le laisserait penser; elle est à peine plus élevée que celle de Lesquin qui se trouve à 120 kilomètres de la Manche et 70 kilomètres de la Mer du Nord.

La station météorologique de **Lesquin**, à l'origine, n'était pas trop perturbée par les obstacles. Mais l'urbanisation de Fâches-Thumesnil, Ronchin et Lesquin, et, surtout l'augmentation sensible du trafic aérien à l'aéroport de Lesquin, entraînant la construction de nombreux bâtiments et d'une nouvelle tour de contrôle, commencent à perturber les valeurs de la vitesse du vent. Météo-France envisage, d'ailleurs, le déplacement du pylône anémométrique.

La station météorologique d'**Epinoy** est située en rase campagne et n'est perturbée que par les bâtiments de la base aérienne sur les secteurs Ouest et Sud-Ouest. C'est avec la station de Dunkerque, un des meilleurs emplacements anémométriques de la région.

Le poste anémométrique du **Cap Gris-Nez** est situé dans un des endroits les plus éventés de la région. En effet, le site est entouré sur près de 270° par la mer. Le pylône est installé sur une falaise et bénéficie donc d'effets de survitesse.

La station automatique de **Saulty** est située en rase campagne, dans l'Artois. Cependant, elle est perturbée sur les secteurs Est, Sud-Est, Sud et Sud-Ouest par l'agglomération de Saulty et les bois avoisinants, distants de 500 mètres du pylône.

La station automatique de **Wancourt** est située dans le Bas-Artois ou Arrageois (grandes plaines de culture), dans un échangeur autoroutier. Elle est perturbée par les bâtiments et superstructures du poste de péage, ainsi que par les plantations d'arbres qui sont en pleine croissance.

La station automatique de **Radinghem** est située dans la vallée d'un affluent de la Lys à 115 mètres d'altitude, au pied des sommets du Haut-Artois (180 à 200 mètres d'altitude). La vitesse du vent y est donc inférieure à celle du Haut-Artois. Le site est assez dégagé, il n'est perturbé sur les secteurs Nord-Est, Est et Sud-Est que par le village de Radinghem et un bois.

La station automatique de **Loos-en-Gohelle** est située dans la région minière, dans une zone industrielle à proximité de la rocade et des terris du 11.19. Du fait de cette rugosité importante, la vitesse du vent y est modérée.

La station automatique de **Saint-Omer** est située dans le marais Audomarois - une cuvette partiellement protégée des vents de secteur Ouest par le plateau de l'Artois -, et surtout par une végétation arbustive importante. Le pylône météorologique est situé à faible distance des habitations et d'une rangée d'arbres de 20 mètres de hauteur. La vitesse moyenne du vent y est donc très diminuée par la forte rugosité du site.

La station automatique de **La Sentinelle** est localisée dans une zone industrielle, à proximité de l'autoroute A2. Pour ces raisons, la rugosité est assez élevée, ce qui explique la faible valeur de la vitesse moyenne du vent. Cependant, pour les secteurs Sud-Ouest, Ouest et Nord-Ouest, le vent n'est pratiquement pas perturbé.

La station automatique de **Steenvoorde**, située dans la Flandre Intérieure, est localisée à la limite est de l'agglomération de Steenvoorde, à proximité d'une rangée d'arbres d'une dizaine de mètres de hauteur et en contre-bas d'un échangeur autoroutier. Bien qu'elle ne soit située qu'à 30 kilomètres de la Mer du Nord, la rugosité assez élevée du site explique la faible valeur de la vitesse moyenne du vent.

La station automatique de **Croix-en-Ternois** est située dans le Ternois, dans un creux, à côté du circuit automobile. Un certain nombre de bâtiments perturbent le vent provenant du secteur Ouest.

La station automatique de **Desvres**, située en Artois près du bord de la cuesta du Boulonnais, est protégée des vents de secteur Ouest et Nord-Ouest par des

arbres; ceci explique la vitesse moyenne modeste du vent malgré la proximité de la Manche (18 kilomètres) et l'altitude du site.

Le pylône météorologique de **Carnin** est situé dans le Carembault, en rase campagne. La rugosité du site est faible.

On peut résumer la qualité des différents emplacements anémométriques de la région par le tableau suivant :

| | BONNE | MOYENNE | MAUVAISE |
|------------------------|-------|---------|----------|
| DUNKERQUE (DUN) | **** | | |
| BOULOGNE (BOU) | | **** | |
| LE TOUQUET (LET) | | **** | |
| LESQUIN LES) | | **** | |
| EPINOY (EPI) | **** | | |
| CAP GRIS-NEZ (CGN) | **** | | |
| SAULTY (SAU) | **** | | |
| WANCOURT (WAN) | | **** | |
| RADINGHEM (RAD) | **** | | |
| LOOS-EN-GOHELLE (LOO) | | | **** |
| ST-OMER (STO) | | | **** |
| LA SENTINELLE (SEN) | | | **** |
| STEENVOORDE (STE) | | | **** |
| CROIX-EN-TERNOIS (CRX) | | **** | |
| DESVRES (DES) | | **** | |
| CARNIN | **** | | |

Tableau 1 : Qualité des emplacements anémométriques de la région Nord-Pas-de-Calais.

Entre parenthèses : abréviations utilisées dans différents tableaux.

LES APPAREILS DE MESURE

Il existe actuellement 5 types de capteurs d'anémomètres : anémomètre à coupelles (les plus répandus), à hélice, à fil ou film chaud, à tube de Pitot et à ultrasons (G. Oualid, P. Grégoire, J. Boulet et alii, 1994). Les capteurs anémométriques utilisés jusqu'ici dans la région Nord-Pas-de-Calais sont composés d'un moulinet et d'un transducteur. Le moulinet peut être constitué soit par des coupelles hémisphériques ou coniques d'un nombre variable, de 3 à 6, ou par une hélice. Dans les appareils de bonne qualité, la vitesse de rotation du moulinet varie linéairement avec la vitesse du vent. Des études ont montré qu'il y avait une réponse linéaire quand le rapport entre le rayon du bras supportant les coupelles et le rayon de ces coupelles était voisin de 2.5. Les anémomètres à 4 et 6 coupelles sont plus précis, pour les vents faibles, que les anémomètres à 3 coupelles. Avant d'utiliser un anémomètre il faut que celui-ci ait été calibré en soufflerie par un organisme agréé. Une vérification annuelle doit avoir lieu. Le transducteur convertit la vitesse de rotation du moulinet en un signal exploitable pour la mesure. La lecture peut se faire sur un cadran. Les valeurs ont été d'abord enregistrées sur des rouleaux de papier puis avec le développement de l'électronique et de l'informatique, dans des banques de données numériques via un modem.

Après avoir consulté les anciens TCM, les ouvrages du Service Hydrologique Centralisateur (*Service Hydrologique Centralisateur, SD*), interrogé l'un des responsables du Service Météorologique Interrégional Nord (SMIRNORD), il apparaît que le matériel de mesure du vent, anémomètre et girouette, est parfois différent d'une station à l'autre et a été remplacé au moins une fois depuis l'ouverture des stations. Le tableau ci-dessous résume le changement des appareils de mesure de la vitesse du vent des stations météorologiques de la région.

| | Dunkerque | Boulogne | Le Touquet | Lesquin | Epinoy |
|----------------------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Anémo électromain | 01.01.1947 | < 01.1957 | | | |
| Anémomètre Papillon, transmetteur d'anémomètre à magnéto | 15.04.1960 | 14.06.1959 | 1951 | 01.12.1945 | 01.01.1954 |
| Type P, transmetteur d'anémomètre fréquencesométrique | 26.09.1974 | 1974 | 03.1969 | 09.10.1975 | 22.11.1973 |
| Tavid, transmetteur d'anémomètre fréquencesométrique | 1985 | 1985 | 1985 | 1985 | 1985 |

Tableau 2 : Chronologie des différents types d'anémomètres utilisés dans les stations synoptiques de la région Nord-Pas-de-Calais

Dans certaines stations, on a utilisé des anémomètres électromain jusqu'au début des années 1960. Cette génération d'appareils a été suivie par l'anémomètre

enregistreur de type Papillon jusqu'à la fin des années 1960 et le milieu des années 1970. Cet anémomètre à 4 coupelles métalliques de 61 millimètres de diamètre portées par des bras d'une longueur de 82.5 millimètres entraîne l'aimant permanent d'une petite magnéto et permet l'enregistrement de la vitesse de vent compris entre 0.5 et 50 m/s (*A. Perlat, M. Petit, 1961*). La précision de ce matériel diminue lorsque la vitesse du vent augmente.

Ce type d'appareil a ensuite été remplacé par des transmetteurs de girouette à recouvrement et des transmetteurs d'anémomètre fréquentométrique de type P fabriqué par Chauvin et Arnoux, voir à ce sujet la documentation en annexe à la page 37. L'anémomètre comporte 3 coupelles en matière plastique. Il entraîne un disque crénelé qui défile entre les bobines d'un circuit oscillant. Il en résulte des impulsions électriques, dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse de rotation des coupelles, donc du vent. Les données de vent, vitesse et direction sont enregistrées sur un enregistreur. La gamme des vitesses mesurées est 0-60 m/s. La girouette se comporte comme une résistance variable à 18 positions de 20°, avec recouvrement des 9 premières.

Les données de vent issues des anémomètres de type Papillon et de type P étaient enregistrées sur du papier. Plusieurs problèmes sont liés à ce type d'enregistrement des données : le réglage du 0 était manuel et parfois les opérateurs modifiaient le réglage effectué par les techniciens du service de maintenance de la Météorologie Nationale. La plume de l'enregistreur frottait sur le papier, aussi l'enregistrement des rafales était sous-estimé sur le diagramme. Ces problèmes ont été résolus lors de l'avènement des stations automatiques avec stockage numérique des informations dans le système d'acquisition de données (datalogger).

A partir du milieu des années 1980, le matériel de type P a été remplacé par du matériel de type Tavid. C'est aussi un matériel de type fréquentométrique, rénové et simplifié. Il est aussi fabriqué par Chauvin et Arnoux. L'anémomètre a les mêmes coupelles que celui du type P; seul le système d'acquisition des données diffère. Toutes les stations automatiques sont équipées de matériel "TAVID", voir en annexe aux pages 38-39 la documentation technique à ce sujet.

Par contre, au Cap Gris-Nez, l'anémomètre est toujours de type S depuis 1973 et les données sont enregistrées sur des diagrammes.

Une nouvelle génération d'anémomètre à lecture optique, Deolia 92, fabriqué par Chauvin Arnoux et Degréane est en cours d'installation dans la région Nord-Pas-de-Calais. En Avril 1994, 5 stations en étaient équipées; toutes les stations devraient en être pourvu en 1996.

Pour les stations automatiques, le SMIRNORD a remarqué que les vitesses élevées étaient sous-estimées, mais sans indiquer de vitesse seuil à partir de laquelle il y aurait un freinage. Le SMIRNORD estime que le capteur utilisé pourrait être responsable de ce problème. Le pylône utilisé vibre aussi dans le cas

de forte vitesse de vent. La quantification de ces effets de freinage est actuellement en cours à Abbeville. Les conclusions de ces tests ne sont pas encore connues. D'autre part une comparaison de 22 anémomètres a eu lieu en 1992 et 1993 au Mont-Aigoual. Les renseignements précis sur la qualité métrologique de chacun des capteurs seront connus à la fin de l'année 1994 (*G. Oualid, P. Grégoire, J. Boulet et alii, 1994*).

LE CHOIX DES STATIONS ET DE LA PERIODE RETENUE

Depuis janvier 1979, les 5 stations synoptiques de Météo-France (Dunkerque, Boulogne, Le Touquet, Epinoy et Lesquin) effectuent 8 mesures trihoraires moyennées sur 10 minutes de la vitesse et de la direction du vent, à 10 mètres au-dessus du sol. Avant cette date, l'anémomètre de la station synoptique de Dunkerque était placé à 16 mètres au-dessus du sol. Un travail précédent (*F. Paul, G. Petit-Renaud, 1984*) a montré que les corrections apportées pour amener les valeurs faites à 16 mètres à celles d'un anémomètre placé à 10 mètres de hauteur modifiaient sensiblement l'histogramme des fréquences de vitesse de vent, ainsi que les traitements statistiques ultérieurs.

De plus, dans les TCM des différentes stations synoptiques, on ne trouve les 8 mesures trihoraires quotidiennes qu'à des dates assez récentes : Dunkerque à partir de Mai 1975, Boulogne en Juin 1975 et le Touquet en Janvier 1977. Seules les stations d'Epinoy (en Janvier 1968) et de Lesquin (en Janvier 1958) ont des données sur une période plus longue.

Afin de travailler sur une période commune aux 5 stations synoptiques de la région Nord-Pas-de-Calais, nous retiendrons pour notre étude la période qui débute le 1er Janvier 1979 et qui s'achève au 31 Décembre 1990.

Les données traitées seront les valeurs trihoraires de vitesse et de direction de vent (00h, 03h, 06h, 09h, 12h, 15h, 18h, 21h TU) moyennées sur 10 minutes.

En climatologie, l'habitude est de travailler sur des normales de 30 ans; la dernière couvre la période 1951-1980. La période retenue de 12 ans peut paraître un peu courte, mais son choix a été dicté dans un souci d'utiliser des données régionales effectuées pendant une période commune et dans les mêmes conditions.

Les 5 stations synoptiques serviront de stations de référence pour les autres points de mesures installés plus récemment.

Les années 1989 et 1990 ont permis d'inclure les valeurs des nouvelles stations automatiques régionales ainsi que les données des stations périphériques, picardes et belges.

LES DONNEES DE VENT

A l'aide d'un logiciel de saisie de données, les valeurs de vitesse et de direction de vent ont été enregistrées sur des disquettes, puis comparées aux documents initiaux (TCM) et éventuellement corrigées.

LES DONNEES MANQUANTES

Le nombre théorique de mesures pour la période étudiée est de 35064 :

soit 3 années bissextiles comptant pour $366 \times 8 \times 3 = 8784$ mesures,
et 9 années normales comptant pour $365 \times 8 \times 9 = 26280$ mesures.

En général, il y a très peu de données manquantes dans les stations synoptiques, moins de 1% (voir les tableaux situés en annexe aux pages 40 à 51) sauf pour Boulogne, car la girouette est tombée en panne durant 3 mois en 1982. Pour la station du Cap Gris-Nez, le taux de données manquantes est compris entre 14 et 17% et pour les stations automatiques, celui-ci est compris entre 1 et 17%. Il semble que les girouettes tombent plus souvent en panne que les anémomètres.

On peut expliquer le faible nombre de données manquantes dans les stations synoptiques par le fait qu'elles ont du personnel à demeure. Quand une panne ou une anomalie se produit, un technicien peut intervenir rapidement et réparer l'appareillage défectueux dans les meilleurs délais.

Par contre, les stations automatiques ainsi que celle du Cap Gris-Nez ont été conçues pour fonctionner sans personnel. Quand une panne se produit, il faut qu'un technicien se déplace à partir de Boulogne ou de Lesquin; les délais de réparation sont donc allongés. Le matériel de ces stations est aussi plus sophistiqué et par conséquent plus fragile et plus sujet aux pannes.

| | DUN | BOU | LET | LES | EPI | CGN | SAU | WAN | RAD | LOO | STO | SEN | STE | CRX | DES |
|-----------|-----|----------|-----|----------|-----|------|------|-----|-----|------|------|-----|-----|------|-----|
| Vitesse | 0.2 | <i>e</i> | 0.5 | <i>e</i> | 0.1 | 14.0 | 4.9 | 0.4 | 4.1 | 11.7 | 12.9 | 2.4 | 7.0 | 11.3 | 7.6 |
| Direction | 0.2 | 1.9 | 0.2 | <i>e</i> | 0.1 | 17.1 | 15.3 | 0.4 | 4.1 | 17.4 | 16.4 | 7.2 | 7.0 | 12.6 | 8.2 |

Tableau 3 : Taux de données manquantes des vitesses et des directions de vent en % 1979-1990.

en italique : période incomplète

LE COMPLEMENT DES DONNEES MANQUANTES (AOÛT-SEPTEMBRE-OCTOBRE 1982) DE DIRECTION DE VENT DE LA STATION SYNOPTIQUE DE BOULOGNE

A Boulogne, le taux de données manquantes pour l'ensemble des mois d'Août, Septembre et Octobre de la période 1979-1990 atteint environ 7%. Cette lacune est importante ; elle risquerait de fausser les résultats des roses de vent, des études de fréquence des directions et du potentiel éolien.

Aussi, nous avons remplacé les données manquantes de direction du vent des mois d'Août, Septembre et Octobre 1982 par des données calculées à partir de celles d'autres stations proches.

Pour reconstituer les données manquantes, nous avons choisi la *technique des tableaux de contingence* (Groupe Chadule, 1974 et R. Arlery, H. Grisollet, B. Guilmet, 1973).

Nous avons comparé les données de Boulogne avec celles des autres stations synoptiques de la région Nord-Pas-de-Calais, plus celles des stations du Cap Gris-Nez et d'Abbeville. A partir de ces tableaux de contingence, dont on trouvera quelques exemples en annexe page 52 et 53, on peut établir de nouveaux tableaux synthétiques dans lesquels sont consignées les fréquences où simultanément, on observe à Boulogne, pour chacun des différents mois, la même direction qu'à la station étudiée, une direction différant au plus de 20° et 40°, ceci pour toutes les directions de vent de la station étudiée (voir annexe pages 54 à 56) ; toutes les informations essentielles de ces tableaux synthétiques sont résumées dans les tableaux 44 à 46 situés en annexe à la page 57.

De l'étude de ces tableaux synthétiques, on remarque que ce sont les stations les plus proches géographiquement de Boulogne (Le Touquet et Cap Gris-Nez) qui ont les directions de vent les plus semblables à celles de la station de Boulogne.

La comparaison des directions du vent mesurées à 10 mètres de hauteur montre que :

- dans 26 à 32% des cas la direction de vent à Boulogne peut se déduire de celle du Touquet,
- dans 66 à 72% des cas, elle peut se déduire de celle du Touquet en admettant une erreur de plus ou moins 20°,
- et dans 83 à 87% des cas, elle peut se déduire de celle du Touquet en admettant une erreur de plus ou moins 40°.

Ces pourcentages moyens diffèrent suivant la direction prise en compte : ils sont élevés pour les directions comprises entre 20 et 80° et 220 à 260°; par contre, on a une mauvaise corrélation pour les directions comprises entre 100 et 160° (voir en annexe page 58 le graphique 9). En effet, on observe un effet de canalisation du vent dans la vallée de la Canche à la station du Touquet; ce phénomène ne s'observe pas à Boulogne.

Nous avons comparé nos résultats avec ceux obtenus par EDF (*H. Gland, J.M. Meynard, 1979, Person, M. Zaidineraitte, 1980 et EDF, SD*). Les travaux d'EDF avaient pour but d'étudier l'existence de corrélations de divers paramètres climatologiques (direction et vitesse du vent, température) entre le site de Gravelines et celui de Dunkerque. En annexe page 59 le tableau 47 résume les résultats de nos travaux et de ceux d'EDF.

Les meilleures corrélations obtenues le sont entre Dunkerque et Gravelines, car ces stations sont très proches (15 kilomètres) et situées sur le même littoral. Par contre, les distances sont plus grandes entre Boulogne et le Touquet (24 kilomètres) et les conditions d'implantation des pylônes anémométriques sont très différentes.

Pour combler les lacunes de la station synoptique de Boulogne, nous avons donc utilisé les données de direction du vent de la station synoptique du Touquet.

LE COMPLEMENT DES DONNEES MANQUANTES DE DIRECTION ET DE VITESSE DE VENT DES STATIONS AUTOMATIQUES.

Pour les années 1989 et 1990, le taux des données manquantes dans les stations automatiques n'est pas négligeable (voir annexes pages 40 à 51). Aussi, nous avons essayé de combler les lacunes en utilisant une autre méthode, basée sur *les régressions linéaires*.

De plus, en 1990, on remarque un nombre de valeurs nulles important dans les stations automatiques du Pas-de-Calais. Une discussion avec le responsable de la station météorologique de Boulogne a montré que ces périodes de calme (parfois longues de 12 à 24 heures) correspondaient en fait à des données manquantes.

La régression linéaire a été calculée chaque mois, pour toutes les vitesses et directions de vent entre une station de référence (en général une station météorologique tenue par du personnel qualifié) et la station automatique où il y a des données manquantes. On obtient ainsi 16 coefficients b_1 et b_0 (de l'équation $b_1x + b_0$), voir annexe page 60, correspondant aux 8 mesures de vitesse et aux 8 mesures de direction du vent effectuées toutes les 3 heures.

Le coefficient de corrélation r (compris entre 0 et 1) ainsi que la variance résiduelle permettent d'apprécier la validité de la relation existant entre les 2

stations. La direction du vent n'est pas une variable quantifiable; calculer une direction moyenne sur un mois n'est donc pas rigoureusement exact. Afin d'éviter le changement brutal de valeur entre 360 et 0°, qui représentent tous les 2 la direction Nord, les données comprises entre 280° et 360° ont été transformées dans le cas où dans les 2 stations la direction d'une des deux stations était comprise entre 0 et 110° et l'autre comprise entre 270 et 360°. Les valeurs comprises entre 280° et 360° deviennent alors négatives. Cette méthode empirique donne cependant d'assez bons résultats.

Pour l'année 1989, dans 85% des cas, le coefficient de corrélation calculé entre les directions a une valeur plus élevée que celle calculée entre les vitesses : on peut combler plus aisément les directions manquantes que les vitesses, d'autant plus que dans environ 80% des cas, le coefficient de corrélation concernant les directions est supérieur à 0.8, et dans plus de la moitié des cas il est même supérieur à 0.9 (voir annexe page 61).

DONNEES MANQUANTES DE CROIX-EN-TERNOIS

Les stations de référence utilisées sont Abbeville (Somme), Lesquin et Le Touquet. Les valeurs des coefficients de corrélation sont plus élevées dans les couples Lesquin-Croix-en-Ternois et Abbeville-Croix-en-Ternois que dans celui de Le Touquet-Croix-en-Ternois (voir annexe page 62). Aussi les données manquantes de Croix-en-Ternois ont été comblées à partir des données d'Abbeville et surtout celles de Lesquin (voir annexe page 63).

DONNEES MANQUANTES DE DESVRES

Les stations de référence utilisées sont Boulogne et Le Touquet. Les valeurs des coefficients de corrélation sont plus élevées dans le couple Boulogne-Desvres que dans celui du Touquet-Desvres (voir annexe page 62), du fait de la plus grande proximité de Boulogne et de la présence de vents de secteur Sud-Est au Touquet. Aussi, les données manquantes de Desvres ont été comblées à l'aide des données de la station de Boulogne (voir annexe page 63).

DONNEES MANQUANTES DE LOOS-EN-GOHELLE

Les stations de référence utilisées sont Epinoy, Lesquin et Wancourt. Du mois de Mai à Décembre 1989, le nombre de calmes s'est fortement accru dans la station de Loos-en-Gohelle. On ne peut imputer cette augmentation uniquement au type de temps anticyclonique qui a régné durant cette période sur nos régions, car dans les autres stations on n'observe pas un tel phénomène. Il s'agirait plutôt d'un problème d'appareil de mesures, d'autant plus que cette fréquence anormalement élevée de calmes est survenue après une longue période de panne (du 4 au 25

Avril 1989). Nous avons donc remplacé, dans les fichiers de données, les longues périodes de calmes consécutifs (parfois pendant plusieurs journées) par des données manquantes qui ont été ainsi recalculées à l'aide des données d'autres stations.

Pour les directions comme pour les vitesses, les coefficients de corrélation les plus élevés sont rencontrés dans les couples Wancourt-Loos et Lesquin-Loos (voir annexe pages 61 et 62). Nous avons comblé les données manquantes de la station de Loos-en-Gohelle essentiellement à l'aide des données de Lesquin (voir annexe page 63).

En 1989, dans environ 50% des cas, la direction du vent recalculée est la même (avec une tolérance de 20°), et dans environ 90% des cas la vitesse recalculée est la même (avec un écart de 1 m/s), quelle que soit la station de référence utilisée.

DONNEES MANQUANTES DE RADINGHEM

Les stations de référence utilisées sont Boulogne, Croix-en-Ternois, Desvres, Le Touquet, St-Omer et Vron (Somme). Pour les vitesses comme pour les directions, les coefficients de corrélation les plus élevés sont rencontrés dans les couples Vron-Radinghem, Croix-en-Ternois-Radinghem, Desvres-Radinghem, St-Omer-Radinghem (voir annexe pages 61 et 62). Par contre, les régressions avec les données de Boulogne et du Touquet ne donnent pas de résultats satisfaisants. Nous avons comblé les données manquantes de la station de Radinghem essentiellement à l'aide des données de la station de Vron, Croix-en-Ternois et Desvres (voir annexe page 63).

En 1989, dans environ 50% des cas, la direction du vent recalculée est la même (avec une tolérance de 20°), et dans environ 75% des cas la vitesse recalculée est la même (avec un écart de 1 m/s), quelle que soit la station de référence utilisée.

DONNEES MANQUANTES DE SAULTY

Les stations de référence utilisées sont Albert (Somme), Bernaville (Somme), Croix-en-Ternois, Epinoy, Loos-en-Gohelle et Wancourt. Une anomalie a été observée sur les TCM de Juin et Juillet 1989. Après la panne de girouette du 21 Avril au 8 Juin 1989, la direction du vent est comprise entre 60 et 100° jusqu'au 7 Juillet : à l'évidence ces données sont erronées et nous les avons considérées comme manquantes. Pour les vitesses et les directions, les coefficients de corrélation les plus élevés sont rencontrés dans les couples Croix-en-Ternois-Saulty, Loos-en-Gohelle-Saulty et surtout Wancourt-Saulty (voir annexe pages 61 et 62). Aussi, nous avons comblé les données manquantes de la station de Saulty essentiellement à l'aide des données de la station de Wancourt (voir annexe page 63).

En 1989, dans environ 60% des cas, la direction du vent recalculée est la même (avec une tolérance de 20°), et dans 72% des cas la vitesse recalculée est la même (avec un écart de 1 m/s), quelle que soit la station de référence utilisée.

DONNEES MANQUANTES DE LA SENTINELLE

Les stations de référence utilisées sont Epinoy et Lesquin. Les valeurs des coefficients de corrélation sont plus élevées dans le couple Epinoy-La Sentinelle que dans celui de Lesquin-La Sentinelle du fait, très certainement, de la plus grande proximité d'Epinoy (voir annexes page 61 et 62). Nous avons comblé les données manquantes de la station de La Sentinelle à l'aide des données de la station d'Epinoy (voir annexe page 63).

En 1989, dans environ 85% des cas, la direction du vent recalculée est la même (avec une tolérance de 20°), et dans 77% des cas la vitesse recalculée est la même (avec un écart de 1 m/s), quelle que soit la station de référence utilisée.

DONNEES MANQUANTES DE STEENVOORDE

Les stations de référence utilisées sont Dunkerque et Lesquin. Les valeurs des coefficients de corrélation sont plus élevées dans le couple Lesquin-Steenvoorde (voir annexe pages 61 et 62). Cela peut s'expliquer par le fait que les phénomènes de brise de terre et de mer se produisent à Dunkerque et ne se retrouvent pas à l'intérieur des terres, à Lesquin comme à St-Omer. Aussi, nous avons surtout utilisé les données de la station de Lesquin pour combler les données manquantes de la station de Steenvoorde (voir annexe page 63).

En 1989, dans 54% des cas, la direction du vent recalculée est la même (avec une tolérance de 20°), et dans 86% des cas la vitesse recalculée est la même (avec un écart de 1 m/s), quelle que soit la station de référence utilisée.

DONNEES MANQUANTES DE ST-OMER

Les stations de référence utilisées sont Boulogne, Dunkerque, Lesquin, Radinghem et Steenvoorde. Pour les vitesses, comme pour les directions, les coefficients de corrélation les plus élevés sont rencontrés dans les couples Radinghem-St-Omer et Lesquin-St-Omer (voir annexe pages 61 et 62). Nous avons comblé les données manquantes de la station de St-Omer à l'aide des données de Boulogne, Lesquin, Radinghem et Steenvoorde (voir annexe page 63).

En 1989, dans environ 60% des cas, la direction du vent recalculée est la même (avec une tolérance de 20°), et dans environ 80 à 90% des cas la vitesse

recalculée est la même (avec un écart de 1 m/s), quelle que soit la station de référence utilisée.

DONNEES MANQUANTES DE WANCOURT

Les stations de référence utilisées sont Albert (Somme), Epinoy, Lesquin, Loosen-Gohelle et Saulty. Les coefficients de corrélation les plus élevés sont rencontrés dans les couples Albert-Wancourt et Epinoy-Wancourt (voir annexe pages 61 et 62). Nous avons comblé les données manquantes de la station de Wancourt à l'aide des données de plusieurs stations (voir annexe page 63).

En 1989, dans environ 50% des cas, la direction du vent recalculée est la même (avec une tolérance de 20°), et dans environ 80 à 90% des cas la vitesse recalculée est la même (avec un écart de 1 m/s), quelle que soit la station de référence utilisée.

LE COMPLEMENT DES DONNEES MANQUANTES DES STATIONS SYNOPTIQUES

Pour les données manquantes des 5 stations synoptiques, qui sont fort peu nombreuses (voir annexe page 40), nous avons utilisé la même méthode que précédemment.

Les données manquantes de Lesquin de Février 1985 ont été comblées à partir des données de la station d'Epinoy, voir annexe page 64. Parallèlement, celles d'Epinoy de Février, Juillet, Août, Septembre, Décembre 1982, Juin 1983, Juillet 1985, Septembre 1986 et Octobre 1988 ont été comblées à partir des données de la station de Lesquin, voir annexe page 64.

Pour Boulogne, 2 stations ont été testées : Dunkerque et Le Touquet. Nous avons comblé les données manquantes de Boulogne de Juin 1983, d'Août, Septembre, Octobre, Novembre 1984, Juillet, Août 1986, Janvier et Octobre 1990 à partir des données de Dunkerque, tandis que celles de Novembre 1983 l'ont été à partir de celles du Touquet, voir annexe page 64.

Les données manquantes de Dunkerque d'Avril, Juin, Novembre, Décembre 1979, Janvier, Juin, Juillet, Septembre, Octobre, Décembre 1980, Mai 1981 et Octobre 1983 ont été recalculées à partir des données de la station de Boulogne, tandis que celles de Février 1980, Juin 1982, Février, Juin 1983 et Avril 1986 l'ont été à partir de celles de Lesquin, voir annexe page 64.

Les données manquantes du Touquet de Mai 1979, Juillet 1980, Mai, Septembre 1982, Avril, Novembre 1983, Janvier, Février, Avril, Décembre 1984, Février, Mars, Juin, Août, Octobre 1985, Mai, Novembre, Décembre 1986, Juin et

Octobre 1987 ont été recalculées à partir des données de la station de Boulogne, voir annexe page 64.

Les données manquantes du **Cap Gris-Nez** sont elles, par contre, très nombreuses, voir annexes page 40 et 42. Celles des mois de Mai, Août, Septembre, Novembre, Décembre 1983, Février, Mars, Octobre, Décembre 1984, Février, Juin, Septembre, Octobre, Novembre 1985, Janvier, Février, Avril, Septembre 1986, Janvier, Mars, Juillet, Septembre, Octobre 1987, Mars, Juillet, Août et Septembre 1988 ont été recalculées à partir des données de la station de Boulogne, voir annexe page 64.

Comme on peut s'y attendre, il n'a pas été possible de recalculer, par la méthode précédemment utilisée, les données manquantes des mois de Juin 1983, Janvier 1985, Juillet, Août 1986, Octobre à Décembre 1988, mois pour lesquels on ne dispose d'aucunes données à la station de Cap Gris-Nez, voir annexe page 42.

Le comblement des données manquantes à l'aide des régressions linéaires est possible et permet d'avoir une estimation de la vitesse et de la direction du vent. Certaines précautions sont à prendre : il faut travailler avec des stations relativement proches, éviter d'utiliser des données d'une station littorale pour combler les données d'une station implantée en milieu terrestre.

De manière générale, les données de la station de Lesquin sont souvent utilisées pour recalculer les données manquantes des autres stations tandis que celles du Touquet ne le sont que très rarement.

Pour l'année 1990, nous avons renoncé à combler les données manquantes d'une station à partir des données des stations automatiques en raison du trop grand nombre de données manquantes, voir annexe page 40.

CRITIQUE DES DONNEES

Afin de s'assurer de l'homogénéité des données de vitesse de vent des stations météorologiques de la région Nord-Pas-de-Calais, nous avons utilisé le *test de Student* (R. Arlery, H. Grisolle, B. Guilmet, 1973). Ce test est utilisé ici pour vérifier l'homogénéité des données d'une même station (test d'homogénéité interne).

On sépare la période de douze ans en 2 parties égales : 1979-1984 et 1985-1990, on applique le test de Student et on obtient une valeur t qui doit être inférieure à 2.23 (t_0 pour un nombre de degrés de liberté égal à 10), au seuil de probabilité de 0.05.

En annexe à la page 65 sont présentés les résultats de ce test pour les stations du Nord de la France pendant la période 1979-1990.

La valeur de t est inférieure à 2.23 pour toutes les stations sauf pour celle d'Epinoy. On peut donc considérer les données des stations de Dunkerque, Boulogne, Le Touquet et Lesquin comme homogènes, tandis que celles d'Epinoy ne le sont pas, au regard de ce test.

Les résultats de ce test diffèrent peu de ceux calculés pour une période plus courte (1979-1988), sauf pour la station du Touquet dont les données n'étaient pas homogènes sur cette période, voir annexe page 66 (F. Paul, G. Petit-Renaud, 1991).

Comme on dispose de données qui remontent à 1970 pour la station d'Epinoy, on peut essayer le test sur d'autres périodes (voir annexe page 65). On remarque que le seul découpage qui donne une valeur de t inférieure à celle de t_0 , au seuil de 5% est 1970-1978 1979-1983, ce qui tendrait à montrer que l'essentiel du problème, concernant l'hétérogénéité des données à Epinoy se situe à partir de 1984. Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour essayer d'expliquer cette hétérogénéité :

une dérive des appareils de mesures et d'enregistrement (majoration systématique de toutes les valeurs) ou une lecture différente des diagrammes de vitesse de vent à partir d'un moment, ce qui aurait comme conséquence le décalage vers le haut des valeurs.

Ce décalage vers le haut est confirmé par le faible nombre de valeurs de vitesse de vent nulles ou égales à 1 m/s.

En annexe à la page 67, le graphique 10 représente la fluctuation annuelle des vents inférieurs ou égaux à 1 m/s à Dunkerque, Epinoy et Lesquin.

A la lecture de ces graphiques, on remarque que le nombre de valeurs pendant lesquelles le vent est inférieur ou égal à 1 m/s fluctue à la station de Lesquin, alors qu'à Epinoy on observe une baisse régulière à partir de 1984-1985. Alors que cette dernière station est située à l'intérieur des terres, en 1987 et 1988, on y observe moins de vents faibles qu'à Dunkerque.

En conclusion, il a été établi une grille d'évaluation qualitative qui synthétise les 3 types d'information nécessaires pour déterminer la qualité de l'information anémométrique (site et mesures).

Les 3 critères retenus sont :

- * l'implantation du pylône, voir le tableau 1 page 26,
- * le taux de données manquantes (0 point entre 0 et 1%, 1 point entre 1 et 5%, 2 points au-dessus de 5%),
- * le test de Student (les 2 tests sont pris en compte : 0 point quand le test est valable, 1 point quand le test est mauvais).

Pour chaque type d'information, une bonne valeur obtient 0 point, une valeur moyenne 1 point et une mauvaise valeur 2 points.

Nous avons établi 2 tableaux : un pour les stations synoptiques et un autre pour les stations automatiques où nous n'avons pas fait de test de Student car la période est trop courte.

| | DUN | BOU | LET | LES | EPI |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Implantation de l'anémomètre | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Données manquantes | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Test de Student | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| TOTAL | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 |

Tableau 4 : Qualité de l'information anémométrique

| | CGN | SAU | WAN | RAD | LOO | STO | SEN | STE | CRX | DES | CAR |
|------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Implantation de l'anémomètre | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 0 |
| Données manquantes | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | ? |
| TOTAL | 2 | 1 | 1 | 1 | 4 | 4 | 3 | 4 | 3 | 3 | ? |

Tableau 5 : Qualité de l'information anémométrique

A la lecture de ces tableaux on remarque qu'à Dunkerque, Lesquin et Boulogne les données anémométriques sont de bonne qualité. Par contre, au Touquet et Epinoy les données ne sont pas de bonne qualité. Dans les stations automatiques, seules Saulty, Wancourt et Radinghem peuvent être considérées comme des stations ayant des données de bonne qualité.

LA VITESSE MOYENNE DU VENT DANS LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS

Nous avons étudié les vitesses moyennes du vent, pour la période 1979-1990, des 5 stations synoptiques de la région Nord-Pas-de-Calais.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Année |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| DUN | 7.1 | 6.8 | 6.7 | 6.2 | 5.6 | 5.7 | 5.6 | 5.6 | 5.8 | 6.1 | 6.3 | 7.0 | 6.19 |
| BOU | 7.1 | 6.2 | 6.4 | 5.2 | 4.9 | 4.9 | 4.9 | 5.1 | 5.7 | 6.3 | 6.3 | 7.0 | 5.84 |
| LET | 5.2 | 4.9 | 4.8 | 4.7 | 4.3 | 4.3 | 4.2 | 4.0 | 4.1 | 4.5 | 4.5 | 4.9 | 4.52 |
| LES | 5.3 | 5.0 | 5.2 | 4.5 | 4.1 | 3.9 | 3.7 | 3.6 | 3.9 | 4.5 | 4.4 | 5.0 | 4.41 |
| EPI | 6.2 | 5.8 | 5.8 | 5.3 | 4.7 | 4.4 | 4.4 | 4.5 | 4.7 | 5.3 | 5.3 | 5.9 | 5.18 |

Tableau 6 : Vitesse moyenne du vent, en m/s.

C'est surtout sur le littoral que la vitesse moyenne du vent est la plus forte : 6.2 m/s à Dunkerque et 5.8 m/s à Boulogne.

En raison de sa situation géographique, la station synoptique de Dunkerque est bien représentative des conditions de vent régnant en mer, au moins pour les directions Ouest, Nord-Ouest, Nord et Nord-Est. Pour les autres directions, il faut tenir compte de la rugosité apportée par les installations portuaires, les usines et l'agglomération.

La station synoptique de Boulogne est située sur une falaise. On y observe donc un effet de survitesse pour les vents provenant de la mer, effet qui est quelque peu atténué par la végétation et les bâtiments de faible hauteur situés entre celle-ci et le pylône anémométrique.

Très vite, le changement de rugosité fait diminuer la vitesse du vent, et celle-ci est déjà inférieure à 5 m/s dans 2 des 3 autres stations synoptiques : 4.5 m/s au Touquet et 4.4 m/s à Lesquin.

La station synoptique du Touquet, située à 2 kilomètres de la Manche, est très protégée des vents soufflant des secteurs Sud-Ouest et Ouest par le massif dunaire boisé, aussi la vitesse moyenne, 4.5 m/s, est beaucoup plus faible que sa situation ne le laisserait penser. Cette moyenne est à peine plus élevée que celle de Lesquin qui se trouve à 120 kilomètres de la Manche et 70 kilomètres de la Mer du Nord.

La vitesse moyenne de la station d'Epinoy, 5.2 m/s, semble être surestimée et confirme ce qui a été dit plus haut, à savoir que les données de vent ne sont pas homogènes et sont peu fiables.

On peut aussi caractériser et classer les stations en fonction du taux de vitesse supérieure ou égale à 7 m/s, ce qui correspond à l'indice 4 et supérieur sur l'échelle de Beaufort (voir le tableau 51 situé en annexe à la page 68). Ce seuil correspond, dans le domaine de l'énergie éolienne, au vent énergétiquement utile. Ce taux décroît du littoral vers l'intérieur des terres : 40% à Dunkerque, 37% à Boulogne, 26% à Epinoy, 20% au Touquet et 19% à Lesquin.

Ces valeurs sont inférieures à celles des stations maritimes et insulaires (51% au Cap de la Hague, 50% au Cap Pertusato, 49% à Ouessant, 47% au Cap de la Hève, 46% au Cap Béar), mais supérieures, en ce qui concerne Dunkerque et Boulogne, à celles de Brest, 32%, Marignane, 29% et Cherbourg, 26% (*J. Kessler, A. Chambraud, 1986*).

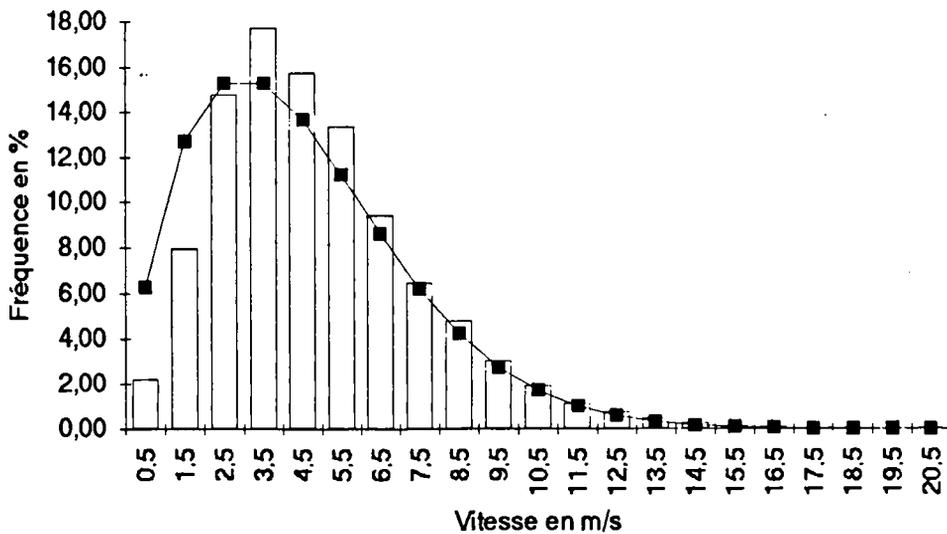
L'histogramme de la page suivante représente la distribution des fréquences des vitesses moyennes de vent, toutes directions confondues, en fonction de classes de vitesses du vent.

Généralement, la distribution des fréquences des vitesses de vent est ajustée par la loi de Weibull. Cette loi comporte 2 paramètres : A, paramètre d'échelle exprimé en m/s et k, paramètre de forme.

La fonction de répartition de Weibull $F(u)$ exprimant la probabilité pour que la vitesse du vent dépasse la valeur u , est donnée par :

$$F(u) = \exp(-(u/A)^k)$$

Quand $k = 1$, la distribution est exponentielle et quand $k = 2$, on obtient une distribution de Rayleigh. Dans l'Europe du Nord, les valeurs de k sont généralement comprises entre 1.5 et 2 (*P. Duchêne-Marullaz, 1977 et E. Petersen, I. Troen, 1988*). Plus la valeur de k est faible, plus la distribution est étalée, voir le graphique en annexe page 162.



Graphique 1 : Distribution des vitesses de vent de la station de Lesquin, 1979-1990, et ajustement par la loi de Weibull : $A = 5.2$, $k = 1.7$.

On trouvera les histogrammes des 4 autres stations synoptiques en annexe aux pages 69 et 70.

La distribution des vitesses de vent présente une dissymétrie positive avec une classe modale égale à 3.5 m/s pour Lesquin, à 4.5 m/s pour Epinoy, Boulogne, Le Touquet et à 5.5 m/s pour Dunkerque. La fréquence des classes modales est plus importante à l'intérieur des terres que sur le littoral, 17 % contre 13 à 14%. La vitesse médiane est de 3.9 m/s à Lesquin, 4.2 m/s au Touquet, 4.8 m/s à Epinoy, 5.2 m/s à Boulogne et 5.8 m/s à Dunkerque, voir à ce propos le graphique représentant la distribution des fréquences cumulées des vitesses de vent des 5 stations synoptiques, situé en annexe à la page 71.

Les distributions ont des allures fort semblables. On observera la fréquence peu élevée de vents faibles à Epinoy; les classes 0.5, 1.5 et 2.5 m/s ont des effectifs plus réduits qu'à Boulogne. Les classes supérieures ou égales à 13.5 m/s ont des effectifs plus importants à Boulogne qu'à Dunkerque, bien que les vitesses moyenne et médiane soient plus faibles à Boulogne.

La plupart des difficultés dans l'ajustement des données mesurées par la loi de Weibull provient des vents forts et des vents faibles. Il est possible de minimiser l'écart entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées en utilisant la méthode des moindres carrés.

Ainsi pour les 5 stations synoptiques de la région Nord-Pas-de-Calais, les meilleurs ajustements sont obtenus avec les valeurs A et k de la loi de Weibull suivantes:

| | Vitesse moyenne | A | k |
|------------|-----------------|---------|-----|
| Dunkerque | 6.19 m/s | 7.2 m/s | 2.2 |
| Boulogne | 5.84 m/s | 7.0 m/s | 1.8 |
| Le Touquet | 4.52 m/s | 5.6 m/s | 2.1 |
| Lesquin | 4.41 m/s | 5.2 m/s | 1.7 |
| Epinoy | 5.18 m/s | 6.1 m/s | 2.1 |

Tableau 7 : Ajustement de la distribution des vitesses de vent par la loi de Weibull. Optimisation de l'ajustement obtenu par la méthode des moindres carrés sur les vents supérieurs à 6 m/s.

Pour Lesquin, le CSTB avait trouvé $A = 5.4$ m/s et $k = 1.7$ (*P. Duchêne-Marullaz, 1977*) pour la période 1962-1970, valeurs très peu différentes de celles que nous avons trouvées pour la période 1979-1990. Par contre pour Epinoy, le CSTB avait calculé $A = 5.1$ m/s et $k = 1.7$ pour la période 1962-1970. L'atlas Eolien Européen (*E. Petersen, 1988*) indique les valeurs suivantes : $A = 5.4$ m/s et $k = 1.9$ pour la période 1970-1979. Ces valeurs sont très différentes de celles que nous avons calculées pour la période 1979-1990. Cela tient à l'augmentation de la vitesse moyenne calculée d'après les données fournies par MétéoFrance depuis les années 1970.

ESTIMATION DE LA VITESSE MOYENNE DU VENT DU POSTE ANEMOMETRIQUE DU CAP GRIS-NEZ ET DES 9 STATIONS AUTOMATIQUES DE LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS

Pour ces stations, nous ne disposons des valeurs de vent que sur une période très courte, 1988 à 1990. A l'aide du rapport (vitesse moyenne (1988-1990) de la station synoptique / vitesse moyenne 1988-1990 de la station automatique) on peut estimer la vitesse moyenne (1979-1990) des stations automatiques.

En annexe, pages 72 à 74, on trouvera l'ensemble des valeurs des vitesses moyennes du vent des 15 postes anémométriques de la région Nord-Pas-de-Calais.

CAP GRIS-NEZ

Pour la période 1983-1988, soit 72 mois de mesures, seuls, 65 sont exploitables (voir annexe page 42). Sur cette période, le rapport entre Boulogne et le Cap Gris-Nez est de 0.854 (VBOU = 5.91 m/s, VCGN = 6.92 m/s), voir le tableau 67 en annexe à la page 75. La vitesse moyenne estimée au poste anémométrique du Cap Gris-Nez pour la période 1979-1990 est de $5.84/0.854$, c'est-à-dire 6.84 m/s. C'est le site anémométrique régional le plus venteux de la région.

SAULTY

Pour la période 1988-1990, le rapport entre Lesquin et Saulty est de 0.974 (VLES = 4.28 m/s, VSAU = 4.40 m/s), voir le tableau 68 en annexe à la page 75. La vitesse moyenne estimée à la station automatique de Saulty pour la période 1979-1990 est de $4.41/0.974$, c'est-à-dire 4.53 m/s.

WANCOURT

Pour la période 1988-1990, le rapport entre Lesquin et Wancourt est de 1.124 (VLES = 4.32 m/s, VWAN = 3.85 m/s), voir le tableau 69 en annexe à la page 75. La vitesse moyenne estimée à la station automatique de Wancourt pour la période 1979-1990 est de $4.41/1.124$, c'est à dire 3.92 m/s.

RADINGHEM

Pour la période 1989-1990, le rapport entre Lesquin et Radinghem est de 0.989 (VLES = 4.35 m/s, VRAD = 4.40 m/s), voir le tableau 70 en annexe à la page 76. La vitesse moyenne estimée à la station automatique de Radinghem pour la période 1979-1990 est de $4.41/0.989$, c'est à dire 4.46 m/s.

LOOS-EN-GOHELLE

Pour la période 1988-1990, le rapport entre Lesquin et Loos-en-Gohelle est de 1.179 (VLES = 4.32 m/s, VLOO= 3.67 m/s), voir le tableau 71 en annexe à la page 76. La vitesse moyenne estimée à la station automatique de Loos-en-Gohelle est de $4.41/1.179$, c'est à dire 3.74 m/s.

SAINT-OMER

Pour la période 1988-1990, le rapport entre Lesquin et Saint-Omer est de 1.574 (VLES = 4.27 m/s, VSTO= 2.71 m/s), voir le tableau 72 en annexe à la page 76. La vitesse moyenne estimée à la station automatique de Saint-Omer est de $4.41/1.574$, c'est à dire 2.80 m/s.

LA SENTINELLE

Pour la période 1989-1990, le rapport entre Lesquin et La Sentinelle est de 1.218 (VLES = 4.35 m/s, VSEN = 3.57 m/s), voir le tableau 73 en annexe à la page 76. La vitesse moyenne estimée à la station automatique de La Sentinelle est de $4.41/1.218$, c'est à dire 3.62 m/s.

STEENVOORDE

Pour la période 1989-1990, le rapport entre Lesquin et Steenvoorde est de 1.421 (VLES = 4.02 m/s, VSTE = 3.06 m/s), voir le tableau 74 en annexe à la page 77. La vitesse moyenne estimée à la station automatique de Steenvoorde est de $4.41/1.421$, c'est à dire 3.10 m/s.

CROIX-EN-TERNOIS

Pour la période 1989-1990, le rapport entre Lesquin et Croix-en-Ternois est de 1.050 (VLES = 4.67 m/s, VCRX = 4.44 m/s), voir le tableau 75 en annexe à la page 77. La vitesse moyenne estimée à la station automatique de Croix-en-Ternois est de $4.41/1.050$, c'est à dire 4.20 m/s.

DESVRES

Pour la période 1989-1990, le rapport entre Lesquin et Desvres est de 1.050 (VLES = 4.43 m/s, VDES = 4.22 m/s), voir le tableau 76 en annexe à la page 77. La vitesse moyenne estimée à la station automatique de Desvres est de 4.41/1.050, c'est à dire 4.20 m/s.

Dans le tableau ci-après, nous avons récapitulé les valeurs moyennes de la vitesse du vent pour la période 1979-1990, 1989 et 1990.

| | 1989 | 1990 | 1979-1990 |
|------------------|------|------|-----------|
| DUNKERQUE | 5.9 | 5.9 | 6.2 |
| BOULOGNE | 5.5 | 6.5 | 5.8 |
| LE TOUQUET | 4.1 | 4.6 | 4.5 |
| LESQUIN | 4.0 | 4.7 | 4.4 |
| EPINOY | 5.0 | 5.7 | 5.2 |
| CAP GRIS-NEZ | | | 6.8 (*) |
| SAULTY | 4.1 | 4.8 | 4.5 (*) |
| WANCOURT | 3.6 | 4.1 | 3.9 (*) |
| RADINGHEM | 4.1 | 4.7 | 4.5 (*) |
| LOOS-EN-GOHELLE | 3.5 | 3.8 | 3.7 (*) |
| ST-OMER | 2.5 | 3.1 | 2.8 (*) |
| LA SENTINELLE | 3.3 | 3.8 | 3.6 (*) |
| STEENVOORDE | 2.8 | 3.3 | 3.1 (*) |
| CROIX-EN-TERNOIS | | 4.5 | 4.2 (*) |
| DESVRES | | 4.4 | 4.2 (*) |

(*) valeurs estimées

Tableau 8 : Vitesse moyenne estimée du vent dans la région Nord-Pas-de-Calais, en m/s.

CORRECTIONS DE HAUTEUR ET DE RUGOSITE

Les valeurs que l'on vient de présenter et d'estimer sont des valeurs brutes : aucune correction concernant la hauteur de l'anémomètre et la rugosité n'a été appliquée.

La hauteur normale à laquelle sont effectuées les mesures de vitesse et de direction du vent est de 10 mètres au-dessus du sol.

Au cours de nos travaux, nous avons remarqué que les techniciens de Météo France ont eu des difficultés à donner la hauteur exacte de leurs anémomètres. Ainsi, de Mars 1988 à Août 1990, dans les feuilles où sont consignés les relevés de vitesse et de direction de vent, il était indiqué, pour les anémomètres des stations automatiques du Pas-de-Calais, une hauteur de 10 mètres. A partir de Septembre 1990, celle-ci passait à 11 mètres. En Avril 1991, un responsable de Météo France du SMIR Nord affirmait que cette différence de hauteur ne correspondait pas à un changement de hauteur de l'anémomètre mais à une erreur systématique lors de l'impression des documents. La véritable hauteur, selon Météo France, serait de 10 mètres au-dessus du sol.

Pour les deux stations automatiques du Nord, Steenvoorde et La Sentinelle, la hauteur de l'anémomètre indiquée sur les TCM est très variable : 8, 10, 25 et 45 mètres au-dessus du sol. Là aussi, Météo France estime qu'il s'agit d'une erreur d'impression et que la véritable position de l'anémomètre au-dessus du sol est de 10 mètres.

Faute d'informations plus fiables, dans nos calculs, nous estimerons donc cette hauteur à 10 mètres pour toutes les stations sauf pour celles du Touquet et d'Epinoy. En effet, les deux anémomètres sont effectivement placés à 11 mètres de hauteur.

La vitesse du vent augmente avec la hauteur, les valeurs sont donc légèrement surestimées pour ces 2 stations.

Pour une longue période, ne connaissant pas la structure thermique de l'air, et comme la différence entre la hauteur du pylône et la hauteur théorique (10 mètres) est faible, nous avons utilisé un modèle de loi exponentielle (C.G. Justus, 1980) :

$$U_z = U_a (Z/Z_a)^\alpha$$

avec U_a , la vitesse moyenne au niveau de l'anémomètre Z_a

U_z , la vitesse moyenne au niveau de l'anémomètre Z

$$\alpha = 0.37 - 0.088 \ln U_a/1 - 0.088 \ln (Z_a/10)$$

Selon cette formule, on déduit que le coefficient α est de 0.24 pour Le Touquet et de 0.22 pour Epinoy, et que par conséquent la vitesse moyenne du vent à 10 mètres est de 4.4 m/s au Touquet et de 5.1 m/s à Epinoy.

En 1987, un pylône d'étude du brouillard a été implanté à Carnin, non loin de Lille. Le vent y est mesuré à différents niveaux : 80, 45, 20, 10 et 5 mètres au-dessus du sol. Nous avons pu récupérer les informations anémométriques des mois de Janvier et Février 1988 qui ont été étudiées par C. Kergomard. Malheureusement, le niveau 10 mètres comporte beaucoup d'erreurs et n'a pu être utilisé. De même, nous n'avons pu retenir que 16 journées de données en raison d'un certain nombre d'erreurs : valeurs nulles ou aberrantes. Le profil vertical de la vitesse du vent a été cependant calculé sur environ 3800 valeurs d'une période relativement ventée, voir le tableau et le graphique situés en annexe à la page 78.

Espace Eolien Développement effectue régulièrement des campagnes de mesures de la vitesse du vent avec un appareillage de marque Ekopower (EED, 1994). Ce matériel permet la mesure et l'enregistrement de la vitesse moyenne et la direction du vent sur une période de 10 minutes en continu. 144 valeurs quotidiennes sont donc enregistrées pendant une période d'au moins six mois. Le tableau ci-dessous fait l'état des mesures effectuées dans la région Nord-Pas-de-Calais.

| | Fresnes-lès-Montauban | Dunkerque Canal des Dunes | Ambleteuse |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|------------|
| Date de démarrage des mesures | 04.05.1993 | 09.09.1993 | 29.09.1993 |
| Date de la fin des mesures | 08.12.1993 | 11.03.1994 | 22.03.1994 |
| Niveaux mesurés | 10 et 22 m | 10 et 31 m | 10 m |
| Qualité de l'emplacement anémométrique | mauvaise | bonne | moyenne |
| Vitesse moyenne recalée sur 12 ans à 10 mètres de hauteur | 3.2 m/s | 6.7 m/s | 5.3 m/s |
| Intensité de la turbulence à 10 mètres de hauteur | 0.16 * | 0.14 | 0.18 |

Tableau 9 : Campagnes de mesures de vent effectuées par Espace Eolien Développement.

* : à 22 mètres

Le coefficient α a pu être calculé sur les sites mesurés par Espace Eolien Développement ainsi que sur celui de Carnin. Les valeurs de ce coefficient sont consignées dans le tableau ci-dessous.

| | Valeur du coefficient α | Type de rugosité du site |
|---------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Carnin | 0.15 | peu rugueux |
| Fresnes-lès-Montauban | 0.35 | rugueux |
| Dunkerque Canal des Dunes | 0.13 | peu rugueux |

Tableau 10 : Valeurs du coefficient α et type de rugosité du site.

Les pylônes anémométriques, dans le Nord de la France, sont généralement installés dans des sites urbains ou périurbains; c'est le cas des stations de Boulogne, Le Touquet, Saint-Omer, Loos-en-Gohelle, Wancourt, Lesquin, Steenvoorde et La Sentinelle. En fait, il existe peu de sites implantés en milieu rural : il s'agit des stations de Saulty et Radinghem. Si on cartographie les valeurs moyennes des vitesses de vent des différentes stations météorologiques, on sous-estime la vitesse moyenne des campagnes environnantes qui ont une rugosité beaucoup plus faible que celle des stations météorologiques.

Le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, CSTB, (*P. Duchêne-Marullaz, 1977*), décrit la méthode qui permet, connaissant la hauteur de l'anémomètre et les caractéristiques de la rugosité du site, de calculer la vitesse du vent à 10 mètres de hauteur en rase campagne. Cette méthode utilise le profil vertical de la vitesse moyenne du vent :

$$V(z) = U^* / k \text{ Log } (z/z_0)$$

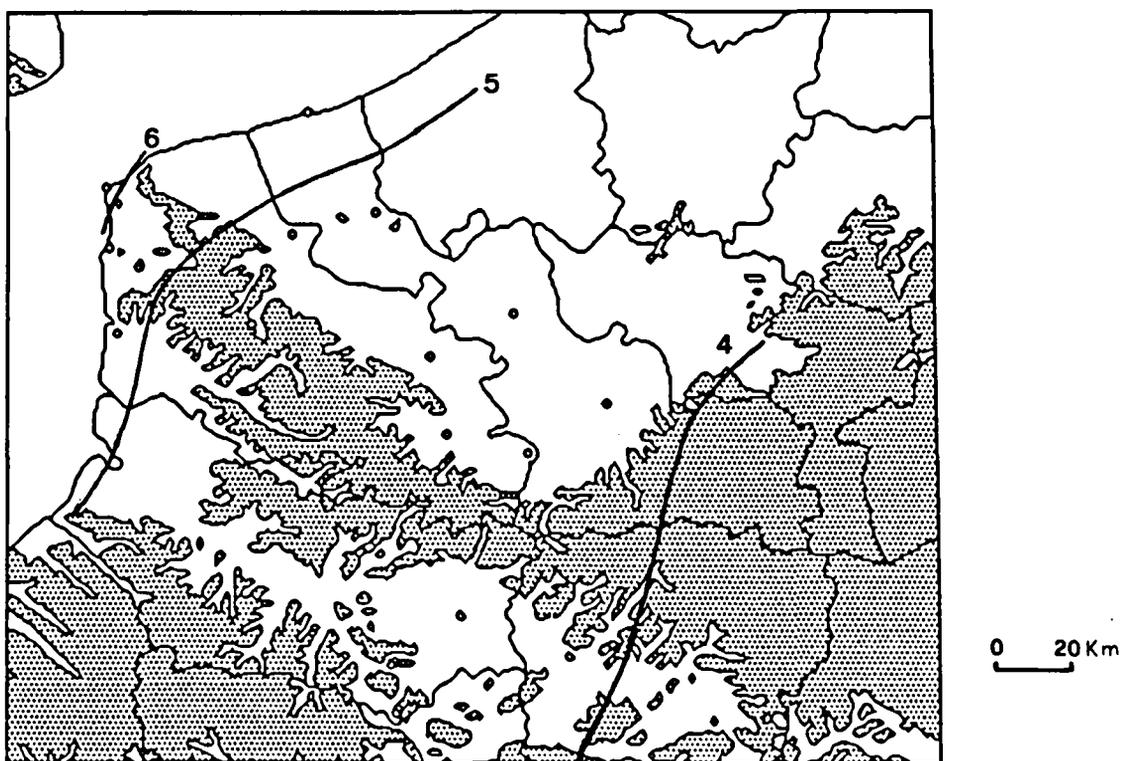
avec $V(z)$, la vitesse moyenne à la hauteur z ,
 U^* , la vitesse de friction,
 k , la constante de Von Karman égale à 0.4,
 z_0 , la rugosité du site.

Cette formule n'est valable que pour les 100 premiers mètres au-dessus du sol, et ne tient pas compte de la stabilité de l'air, qui est souvent inconnue.

En 1977, le CSTB (*P. Duchêne-Marullaz, 1977*) avait étudié les données de vent de la période 1962-1970 de 74 stations météorologiques françaises, dont 3 étaient situées dans la région Nord-Pas-de-Calais : Lesquin, Epinoy et Calais-Marck. Le CSTB n'avait appliqué des corrections de rugosité qu'à la station de Lesquin. Elles concernaient les directions comprises entre 300 et 80°, perturbées par l'agglomération lilloise. Pour ces directions, le CSTB prévoyait un coefficient correcteur de 1.10.

CARTOGRAPHIE DE LA VITESSE DU VENT DE LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS

Nous présentons ci-dessous une carte de la vitesse moyenne du vent de la région Nord-Pas-de-Calais pour la période 1979-1990. C'est une carte simplifiée, qui a été établie à partir des données estimées dans les pages précédentes (tableaux 6 et 8 p. 42 et 48), de celles des départements picards et provinces belges limitrophes (voir les tableaux 78 à 80 en annexe aux pages 79 à 81), ainsi qu'à partir de différentes cartes belges, dont celle de R. Fabry, voir en annexe à la page 82 (*R. Fabry, 1983*). Pour établir cette carte, il est également tenu compte de la qualité de l'emplacement des pylônes anémométriques (voir le tableau 1 à la page 26).



Carte 2 : Vitesse moyenne du vent dans la région Nord-Pas-de-Calais à 10 mètres au-dessus du sol, en m/s, pour la période 1979-1990.

La courbe des 6 m/s longe le littoral de la Mer du Nord et de la Manche. En effet, 2 stations côtières, Cap Gris-Nez et Dunkerque, ont des valeurs qui dépassent 6 m/s : 6.8 et 6.3 m/s respectivement.

Très vite, le changement de rugosité fait diminuer la vitesse du vent, et la courbe des 5 m/s, parallèle au littoral, se situe probablement à une dizaine de kilomètres de la côte. Il n'y a qu'une station localisée entre 5 et 10 kilomètres du littoral qui nous permette de positionner la courbe des 5 m/s : c'est la station de Calais-Marck qui a démarré en 1991. Une estimation faite à partir de 7 mois de données a permis d'évaluer la vitesse moyenne de cette station à 5.1 m/s (*EED, 1994*). La courbe des 5 m/s fait vraisemblablement la limite entre la Plaine Maritime et la Flandre Intérieure, passe au Nord de Saint-Omer, grimpe sur le plateau d'Artois, passe entre Abbeville et la baie de la Somme. Les fonds de vallée, comme le val d'Authie et de Canche ainsi que le Boulonnais, les zones protégées par les massifs dunaires ont des vitesses moyennes beaucoup plus faibles; ainsi, à la station du Touquet, bien que située à 2 kilomètres de la mer, on ne relève que 4.5 m/s.

Il manque des informations anémométriques dans les arrondissements de Cambrai et d'Avesnes-sur-Helpe pour faire passer avec certitude la courbe des 4 m/s dans notre région. Cependant, les données des stations météorologiques du département de l'Aisne, de Belgique, ainsi que la carte de R. Fabry (*R. Fabry, 1983*) située en annexe à la page 82 nous ont aidé à la positionner.

Dans la zone délimitée par les 2 courbes 4 et 5 m/s, certaines régions, comme le Marais Audomarois, les fonds de vallée, comme celles de la Canche, de l'Authie, de l'Escaut, les agglomérations, ont des vitesses moyennes inférieures à 4 m/s. Par contre, sur les sommets de collines, la vitesse moyenne dépasse certainement les 5 m/s.

Dans l'Avesnois, la vitesse moyenne du vent est comprise entre 3 et 4 m/s. Comme le montre la valeur de la station de Clairfontaine, il est possible que sur certains sommets dégagés, la vitesse du vent soit supérieure à 4 m/s.

En annexe aux pages 83 et 84, on trouvera deux cartes représentant la vitesse moyenne du vent dans la région Nord-Pas-de-Calais, à 10 mètres au-dessus du sol, pour les années 1989 et 1990.

Ces considérations sont les principaux enseignements que l'on peut tirer des données publiées dans les tableaux climatologiques mensuels de la Météorologie Nationale et de l'Institut Royal Météorologique de Belgique. Comme on le voit, beaucoup d'incertitudes demeurent et la carte de la page précédente doit être considérée comme une première contribution.

Le Nord-Pas-de-Calais est une des régions françaises où la vitesse moyenne du vent est la plus importante. En effet, sur les 96 stations, bien réparties sur tout le territoire national, présentées dans le RMT, Dunkerque arrive au 3^{ème} rang, pour la vitesse moyenne du vent calculée sur la période 1979-1988, Boulogne est 6^{ème}, Le Touquet 20^{ème} et Lesquin 24^{ème}.

Du fait de la complexité du relief et du faible nombre de stations situées en région montagneuse, nous n'avons pas représenté sur la carte les courbes d'iso-vitesse pour les massifs montagneux : Vosges, Jura, Pyrénées, Massif-Central, Alpes, Corse.

A partir de ces résultats, il apparaît que les régions où les vitesses de vent sont les plus élevées, plus de 5 m/s, sont celles qui bordent la Mer du Nord, la Manche et l'Atlantique, c'est-à-dire, le littoral du Nord-Pas-de-Calais, de la Somme, de la Normandie, de la Bretagne et de la Vendée, ainsi qu'une partie du littoral méditerranéen, soit la Camargue et le Languedoc. Les sommets des massifs montagneux, comme l'Aigoual, les hauts plateaux ou les sommets de collines, comme le Mont-Saint-Vincent ont aussi des valeurs supérieures à 5 m/s. De manière générale, nous n'avons pas beaucoup d'informations sur les régions montagneuses et nous ne pouvons aller plus loin dans l'évaluation de la vitesse moyenne du vent.

La courbe des 4 m/s va de l'Avesnois jusqu'à la Charente Maritime. Les régions comprises entre les courbes 4 et 5 m/s sont : une bonne partie du Nord-Pas-de-Calais, la Picardie, l'Île-de-France, le Centre, la Normandie, les Pays de Loire et une bonne partie de la Bretagne. A l'intérieur de cette zone ainsi délimitée, on trouve une région où la vitesse est inférieure à 4 m/s : le Maine et le bocage normand. Cette vitesse moindre peut s'expliquer par une rugosité plus importante (bocage). Au sud du pays, la courbe des 4 m/s va de Perpignan au littoral varois, en passant par Montpellier et Montélimar. Ces régions correspondent au domaine d'influence de la Tramontane et du Mistral.

Viennent ensuite les régions où les vents sont beaucoup plus modérés, de 2.5 à 4 m/s : Champagne-Ardennes, Lorraine, Alsace, Bourgogne, Centre, Poitou, Aquitaine et Midi-Pyrénées. Ces régions forment près de la moitié du territoire français.

Comparaison avec d'autres travaux

Il existe peu de travaux concernant la cartographie de la vitesse du vent en France. Toutefois, un atlas régional Nord-Pas-de-Calais a été effectué en 1991 par le Laboratoire de Climatologie de l'Université des Sciences et Techniques de Lille (*F. Paul, G. Petit-Renaud, 1991*). Au début de l'année 1993, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie a lancé la réalisation de l'atlas éolien des régions littorales françaises : Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côtes d'Azur, Poitou-Charente, Pays de la Loire, Bretagne, Basse et Haute Normandie, Picardie, Nord-Pas-de-Calais et DOM-TOM. Les résultats seront progressivement connus au fil de l'avancement de l'étude, programmée sur 3 à 4 ans.

En 1977, le CSTB (*P. Duchêne-Marullaz, 1977*) n'avait pas publié de carte de vitesse moyenne du vent à 10 mètres de hauteur, mais des cartes d'iso-vitesses pour un certain nombre de fréquences (voir annexe page 85). Toutes les cartes présentées dans ce travail sous-estimaient les valeurs du vent dans la région Nord-Pas-de-Calais, notamment pour le littoral, car le CSTB utilisait les valeurs sous-estimées de la station de Calais-Marck.

En effet, cette station n'était pas représentative du littoral de la Mer du Nord, car le pylône anémométrique était protégé, pour les vents dominants, par la tour de contrôle, fait qui n'avait pas été pris en compte, à l'époque, par le CSTB.

Dans un travail plus récent (*P. Duchêne-Marullaz, C. Sacre, SD*), le CSTB a corrigé en partie l'erreur concernant la région Nord-Pas-de-Calais, mais la carte (voir annexe page 86), ne nous paraît pas correspondre à la réalité. Selon nos travaux, ainsi que ceux effectués en Belgique (*R. Fabry, 1983*), la courbe des 5 m/s est située à l'intérieur des terres, et est parallèle au littoral de la Mer du Nord.

En conclusion, il nous semble qu'il est très difficile de faire une carte de France de la vitesse moyenne du vent à partir d'une centaine de points de mesures; les erreurs faites dans le passé sont compréhensibles. La carte présentée ci-dessus n'est certainement pas parfaite, mais à l'heure actuelle, avec le faible nombre de stations anémométriques, il est difficile d'être beaucoup plus précis. Il serait nécessaire de multiplier les points de mesure de vitesse de vent dans le pays. La politique actuelle de MétéoFrance va dans ce sens; elle n'est malheureusement pas à son terme et ne concerne pas toutes les régions. Au début de l'année 1994, MétéoFrance gérait environ 600 anémomètres. Un certain nombre d'entre eux sont malheureusement très mal implantés; aussi le nombre de stations réellement utilisables est beaucoup plus réduit.

**DIRECTION DES VENTS
ET
CIRCULATION ATMOSPHERIQUE**

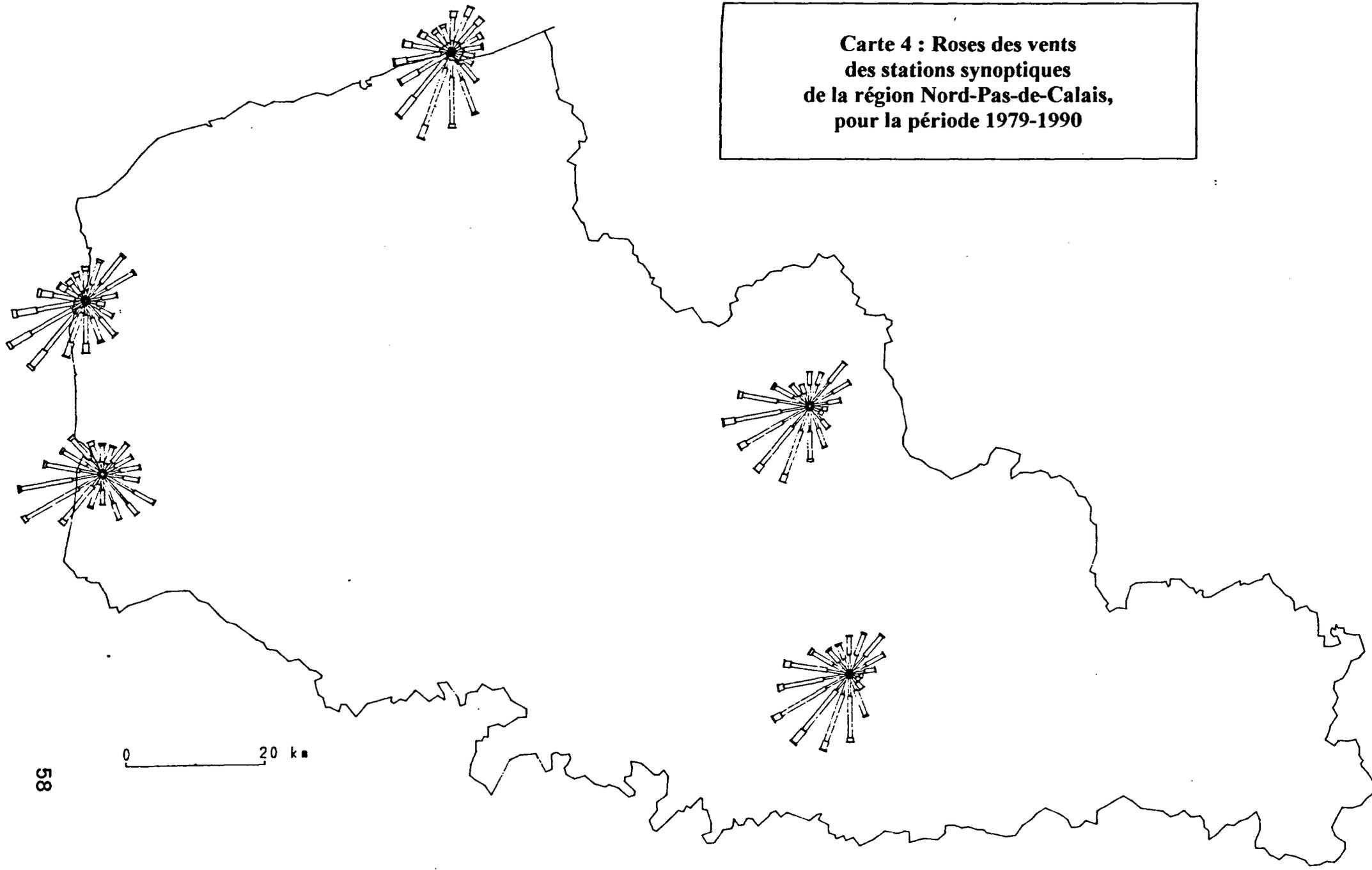
DIRECTION DES VENTS

Les données de vent, direction et vitesse, ayant été validées et complétées, nous avons, à l'aide d'un programme élaboré par M. Petit-Renaud, classé les données de vent en un tableau de répartition de la vitesse du vent en fonction de la direction (voir les tableaux situés en annexe aux pages 87 à 89).

A partir de ces tableaux de fréquence de vent, il a été possible d'éditer des roses des vents. On trouvera à la page suivante les roses des vents pour la période 1979-1990 des 5 stations synoptiques. En annexe aux pages 90 à 101 sont présentées les cartes des roses annuelles de 1979 à 1990.

Pour les cartes annuelles de 1979 à 1988, ainsi que pour la carte couvrant toute la période d'étude, il n'a été représenté que les roses des stations synoptiques. Par contre, pour les cartes de 1989 et 1990, il a été possible d'y faire figurer aussi les roses des stations automatiques.

**Carte 4 : Roses des vents
des stations synoptiques
de la région Nord-Pas-de-Calais,
pour la période 1979-1990**



Plusieurs classes de vitesse de vent ont été utilisées : 2 à 4 m/s, 5 à 9 m/s, 10 à 14 m/s, supérieures ou égales à 15 m/s. Les calmes et les vitesses égales à 1 m/s ont été soustraits. En annexe à la page 102, nous représentons les roses des vents de l'année 1990 en soustrayant les vents faibles, c'est-à-dire les calmes et les classes 1 et 2 m/s, comme le préconise M. Erpicum (*M. Erpicum, 1991, J. Alexandre, M. Erpicum, C. Vernemmen, 1992*). Ces vents faibles ont des directions dépendant fortement des conditions topographiques locales et influencent par leurs grandes fréquences les roses des vents censées représenter les conditions de référence régionale (*M. Erpicum, 1991*). Ainsi, à Lesquin, les vitesses de vent inférieures ou égales à 2 m/s ont une occurrence de 24.9% à Lesquin, 22.1% au Touquet, 16.2% à Boulogne, 12.8% à Epinoy et 9.2% à Dunkerque. En Belgique, le taux de vents faibles est équivalent à ce que l'on trouve dans la région Nord-Pas-de-Calais : 11 à 17% sur le littoral de la Mer du Nord, 26% dans le Hainaut, 21% à Bierset dans la Hesbaye et atteint 35% à Liège-Monsin dans un site de fond de vallée (*J. Alexandre, M. Erpicum, C. Vernemmen, 1992*).

De l'étude de ces roses de vent, on peut constater que les directions dominantes des vents sont le Sud, le Sud-Ouest et l'Ouest. P. Biays (*P. Biays et coll., 1968*) explique cette prédominance des vents de secteur Sud-Ouest par le passage répété des perturbations à travers les îles Britanniques.

Les secteurs Nord et Nord-Est sont des directions dominantes secondaires. Les vents de secteurs Est, Sud-Est et Nord-Ouest sont beaucoup moins fréquents.

Lesquin et Epinoy ont des directions de vent relativement identiques tout au long de l'année. Les phénomènes de brise peuvent expliquer les différences observées dans les directions de vent entre les stations du littoral et celles de l'intérieur.

La position du littoral explique aussi l'allure différente des roses de Dunkerque et de celles de Boulogne et du Touquet (les brises sont plus ou moins perpendiculaires au littoral). Cette dernière station étant bien protégée des vents maritimes, les brises s'y produisent plus souvent, ce qui explique la forme particulière des roses dans cette station.

Les roses annuelles de 1989 et 1990 sont assez semblables pour les stations de Lesquin, Epinoy, Loos-en-Gohelle, Saulty, Croix-en-Ternois, Desvres et Steenvoorde.

Par contre, les roses de Wancourt, La Sentinelle, Radinghem, Dunkerque et Le Touquet sont assez différentes de celle de Lesquin.

A Radinghem, les secteurs Est à Sud-Est sont sous-représentés du fait de la proximité d'un bois.

A Saint-Omer, la présence de plusieurs rangées d'arbres a une influence notable sur les vents des secteurs Nord à Nord-Est.

A Wancourt, les obstacles situés au Sud-Est et au Sud de l'anémomètre ne suffisent pas à expliquer le déficit des vents dans cette direction, la position dominante des vents du secteur Nord-Est et une fréquence non négligeable des vents de Nord-Ouest surtout observés en 1990.

A La Sentinelle, le secteur Sud semble sur-représenté; nous n'avons actuellement aucun élément qui permette de donner une explication satisfaisante.

VARIATIONS ANNUELLES DES DIRECTIONS DE VENT

Les roses des vents diffèrent d'une année à l'autre, comme le montre les différentes cartes annuelles, voir les annexes pages 90 à 101. Cependant, la direction dominante est toujours le secteur Sud-Sud-Ouest.

C'est à Dunkerque et Boulogne que les roses annuelles ressemblent le moins à la rose moyenne (1979-1990). Par contre, à Lesquin et Le Touquet, les roses annuelles ressemblent assez fortement à la rose moyenne.

Pour les 5 stations synoptiques, les roses des années 1979, 1980 et 1989 sont pratiquement identiques à celles de la période 1979-1990, sauf pour Boulogne pour les 2 premières années et Dunkerque pour 1989. Les roses de 1990 sont encore assez proches des roses de la période 1979-1990.

Nous présentons ci-dessous quelques commentaires sur les situations annuelles :

1979

Les roses sont assez semblables à celles de la période 1979-1990, sauf celle de Boulogne. De manière générale, on observe pour cette année une plus grande fréquence de vents du Sud-Sud-Ouest et une fréquence moins élevée des vents de Nord-Est.

1980

Les roses sont assez semblables à celles de la période 1979-1990, sauf celle de Boulogne qui est très différente de la rose moyenne. En effet, on observe à Boulogne une plus grande fréquence de vents du Sud-Est, d'Ouest et du Nord et une fréquence moins élevée des vents de Sud-Ouest. Pour les autres stations, on observe une plus grande fréquence de vents du Sud-Est au Touquet et une fréquence moins élevée de vents du Sud à Dunkerque.

1981

Les roses de Boulogne, Dunkerque et Le Touquet diffèrent des roses moyennes par une plus grande fréquence de vents du Sud-Ouest. La fréquence des vents de Nord-Est est moins élevée surtout pour les stations de Lesquin, Boulogne et Epinoy.

1982

On observe une plus grande fréquence des vents de Sud-Est pour toutes les stations sauf celle de Dunkerque et une fréquence moins élevée des vents d'Ouest à Lesquin, Epinoy et Le Touquet. A Epinoy, la fréquence des vents de Sud est plus importante qu'en moyenne. A Dunkerque, la fréquence des vents du Sud et du Nord-Est est plus élevée, tandis qu'on remarque un déficit dans la direction Sud-Sud-Ouest.

1983

Le caractère marquant de cette année est la plus grande fréquence des vents de Sud-Ouest dans toutes les stations. La fréquence des vents de Sud-Sud-Est est moins élevée au Touquet et à Boulogne mais plus élevée à Epinoy. Dans cette dernière station, la fréquence des vents de Sud-Est est plus importante tandis que les vents d'Ouest sont moins fréquents. A Boulogne, on observe une fréquence de vents de Sud-Est plus importante.

1984

Les caractères dominants de l'année sont une plus grande fréquence des vents de secteur Nord et Nord-Nord-Est et une fréquence moins élevée dans la direction Sud-Ouest. Au Touquet, les vents du Sud-Est sont beaucoup plus fréquents qu'en temps normal.

1985

Une fréquence plus élevée des vents du Sud-Ouest et moins élevée des vents du Nord sont les caractéristiques essentielles de cette année. On observe aussi un supplément de vents d'Ouest et d'Est à Epinoy. A Boulogne, les vents de Nord-Est et, à Dunkerque, les vents d'Est sont aussi plus fréquents.

1986

Cette année est caractérisée par une fréquence de vents de Nord-Est plus élevée sauf pour Le Touquet où c'est la direction Est qui est un peu plus fréquente. On observe aussi une fréquence de vents du Sud-Sud-Ouest plus élevée à Dunkerque, de Sud-Ouest à Boulogne et d'Ouest au Touquet, Lesquin et Epinoy. Dans une moindre mesure il y a un déficit de vents du secteur Nord au Touquet, Boulogne et Epinoy.

1987

Les vents de Nord-Est et d'Est sont plus fréquents. On observe aussi plus de vents du Sud-Ouest à Dunkerque et Boulogne. Par contre, il y a un déficit de vents dans les secteurs Ouest à Boulogne, Le Touquet et Lesquin, et Sud à Lesquin et Epinoy.

1988

On observe une fréquence de vents du Nord et de Sud-Ouest plus élevée et une fréquence de vents du Sud plus faible à Dunkerque qu'en situation moyenne. A Boulogne, les vents de Nord-Est et de Sud-Ouest sont plus fréquents, tandis qu'au Touquet, les vents d'Ouest sont plus nombreux et ceux du Sud-Est moins bien représentés qu'en temps normal. Les roses de Lesquin et d'Epinoy sont à peu près conformes aux roses moyennes si ce n'est que les vents de Sud-Ouest sont plus fréquents à Lesquin, ceux d'Ouest plus nombreux et ceux du Sud moins nombreux à Epinoy.

1989

Les roses sont assez semblables à celles de la période 1979-1990, sauf celle de Dunkerque qui est très différente de la rose moyenne. En effet, les vents des secteurs Ouest et Sud-Ouest sont beaucoup moins représentés, tandis que ceux du Nord et du Sud-Est sont beaucoup plus fréquents qu'en moyenne. Pour les autres stations, les vents du Sud-Ouest sont moins fréquents qu'en temps normal. A Epinoy, le secteur Nord est plus présent et les secteurs Sud-Sud-Est et Ouest moins fréquents. Les vents de Sud-Est sont aussi plus fréquents au Touquet.

1990

Les roses sont assez semblables à celles de la période 1979-1990. Cependant, à Dunkerque les vents du Sud et du Sud-Est sont plus nombreux qu'en temps normal. A Boulogne et au Touquet, les vents d'Ouest sont plus fréquents, tandis

que ceux du Sud-Est le sont moins. A Epinoy, les vents du Sud-Sud-Est sont moins fréquents qu'en moyenne et ceux d'Ouest le sont plus.

VARIATIONS SAISONNIERES DES DIRECTIONS DE VENT

Les directions de vent varient également en fonction de la saison. On trouvera en annexe, pages 103 à 114, les roses de vent mensuelles des 5 stations synoptiques de la région Nord-Pas-de-Calais.

En hiver (Décembre, Janvier, Février), on observe une prédominance des vents de secteur Sud, Sud-Ouest et Ouest, ce qui correspond aux temps perturbés venant de l'Atlantique. A Dunkerque, Boulogne et au Touquet, on observe des phénomènes de brises (déplacement d'air de la terre refroidie vers la mer plus chaude). Les roses de Lesquin et d'Epinoy sont pratiquement identiques. En Décembre, les vents de Nord-Est semblent moins fréquents que pour la période 1961-1975 (*M.M. Dewailly, 1979*). En Février, on observe une fréquence importante de vents du Nord-Est et de l'Est, ce qui s'explique par la présence d'anticyclones continentaux centrés sur la Scandinavie.

Au printemps (Mars, Avril, Mai) : au mois de Mars, les vents de Sud, Sud-Ouest et Ouest l'emportent largement; le passage des perturbations venant de l'Atlantique en est l'explication. Au mois d'Avril, les vents de secteur Nord et Nord-Est dominant, ce qui correspond soit à un anticyclone centré sur les Iles Britanniques ou à l'Ouest de celles-ci, soit à des temps de giboulées (*G. Petit-Renaud, 1979*). En Mai, les roses sont régulières pour les deux stations de l'intérieur. Pour les stations du littoral, on observe des phénomènes de brises : plus grande fréquence de vents du Nord et Nord-Est à Dunkerque, de Sud-Ouest à Boulogne et au Touquet. Dans cette dernière station, on observe aussi une plus grande fréquence de vents de Sud-Est.

En été (Juin, Juillet, Août) : prédominance des vents de secteur Sud-Ouest à Ouest qui s'explique par le passage de perturbations et par la présence d'un anticyclone atlantique. En Juin, les secteurs Nord et Nord-Est sont encore bien représentés. A Dunkerque, en Juillet et en Août, les vents dominants sont de direction Sud-Sud-Ouest, alors que dans les autres stations, les directions dominantes sont le Sud-Ouest et l'Ouest. Au Touquet, on observe toujours une fréquence plus élevée de vents de Sud-Est que dans les autres stations.

En automne (Septembre, Octobre, Novembre) : la rose du mois de Septembre ressemble à celle du mois d'Août; il y a une prédominance des vents de secteur Sud à Ouest, comme l'avait déjà remarqué M.M. Dewailly dans son étude consacrée à l'automne dans la région Nord-Pas-de-Calais (*M.M. Dewailly, 1979*). En Octobre et en Novembre, les roses sont très semblables : prédominance des vents de Sud à Sud-Ouest. Les phénomènes de brises peuvent expliquer les fréquences plus élevées de vents du Sud à Dunkerque et de Sud-Est au Touquet.

Ce sont les roses des mois de Mars et de Septembre qui ressemblent le plus à la rose moyenne et celles des mois de Février, d'Avril et de Juin qui en sont les plus éloignées.

Le caractère essentiel du vent dans notre région est la prédominance de la direction Sud-Ouest quelle que soit la saison. Ces résultats sont en accord avec les travaux faits en 1968 par la Météorologie Nationale sur les directions des vents des stations de Boulogne et Dunkerque, à partir des données des années 1951-1960 (*J. Darchen, A. de Block, 1968*).

A Dunkerque, il y a peu de différences avec les roses mensuelles établies sur une période différente, 1977-1983, lors d'une étude précédente (*F. Paul, G. Petit-Renaud, 1984*), ce qui montre une certaine régularité dans le régime des vents.

Il est aussi possible de juger la qualité des stations météorologiques en fonction des anomalies observées dans les roses des vents. On attribuera 0 point si il n'y a aucune anomalie, 1 point si certaines fréquences sont sous- ou surestimées, et 2 points si la rose des vents diffère de l'allure des autres roses, sans qu'il y ait une explication topographique ou géographique valable.

| BOU | DUN | LET | LES | EPI | CRX | DES | LOO | RAD | SAU | SEN | STE | STO | WAN |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 2 |

Tableau 11 : Qualité de l'information tirée de l'étude des directions de vent.

CIRCULATION ATMOSPHERIQUE, DIRECTION ET VITESSE DU VENT

Le Nord de la France, région peu étendue, est affecté, sur toute sa surface en même temps, par la même situation atmosphérique. Le relief ne créant pas de vents locaux, il s'ensuit, qu'à un moment donné, les directions de vent sont généralement convergentes. Cela est d'autant plus vrai, que la vitesse du vent, qui est proportionnelle à la variation latérale de la pression (*A. Viaut, 1978*), est forte ou modérée; voir à ce sujet la carte située en annexe à la page 115.

Par contre, en situation de marais barométrique, ou quand la variation latérale de pression est peu importante, la vitesse du vent est faible. Des phénomènes de brises peuvent se déclencher sur le littoral, en milieu urbain; les directions des différentes stations de la région Nord-Pas-de-Calais peuvent être alors divergentes, voir la carte située en annexe à la page 115.

LES DIFFERENTS TYPES DE TEMPS

La position des centres d'actions est bien connue. L'anticyclone des Açores, la dépression islandaise ou encore celle du golfe de Gênes, pour ne parler que des plus connues, déterminent le temps sur la France. La dimension, la forme, la position, la mobilité des centres d'actions sont autant de paramètres qui induisent le type de temps sur une région.

Pour le Nord de la France, l'élément essentiel est la position de l'anticyclone des Açores qui oblige les dépressions à le contourner par le Nord. En effet, depuis Buys-Ballot, on sait que dans l'hémisphère Nord le vent tourne autour des anticyclones dans le sens des aiguilles d'une montre et autour des dépressions dans le sens inverse.

Les types de temps qui constituent la base de ce travail sont ceux définis par H.H. Lamb (*H.H. Lamb, 1972*), c'est-à-dire :

- * l'anticyclone,
- * un certain nombre de situations intermédiaires (AN, AW, ...) où la pression est élevée (> 1020 hPa) mais où la variation latérale de pression, donc la vitesse du vent n'est pas négligeable,
- * les types de temps perturbés : les flux d'Ouest, de Nord-Ouest, de Nord, de Nord-Est, d'Est, de Sud-Est, de Sud, de Sud-Ouest,
- * les temps cycloniques avec une composante géographique ou non.

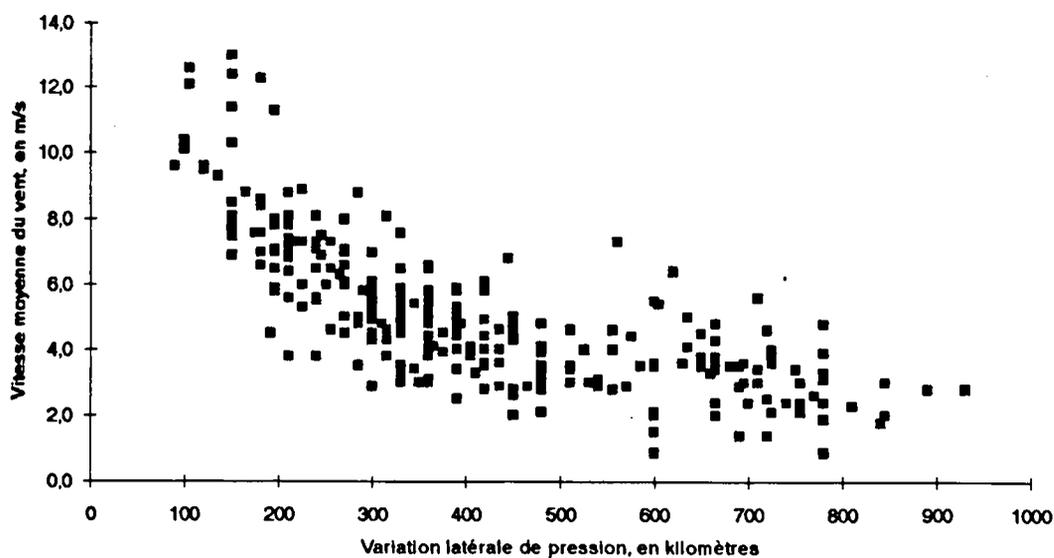
Les types de temps qui affectent la région Nord-Pas-de-Calais ont été déterminés à partir des informations figurant sur les Bulletins Météorologiques Européens (BME) publiés quotidiennement par le Deutscher Wetterdienst. Quand le BME

manquait, nous avons utilisé Météo.hebdo, publié par MétéoFrance depuis Novembre 1985, et le Boletín Meteorológico Diario publié par l'Institut National de Meteorologie à Madrid. Pour déterminer quotidiennement le type de temps sur le Nord-Pas-de-Calais à 12 heures pour la période 1979-1990, soit 4383 cas, il a été possible de s'aider de la détermination quotidienne des types de temps en Angleterre (Janvier 1979 à Novembre 1988) publiés dans la revue trimestrielle de l'Université d'East Anglia, Climate Monitor. Nous avons aussi consulté le travail de Kouame (*K. Kouame, 1983*) sur les types de temps du Nord-Pas-de-Calais (Janvier 1980 à Décembre 1982), ainsi que les commentaires publiés dans Météo.hebdo.

La valeur de la pression au sol à 12 heures sur le Nord-Pas-de-Calais a été lue dans le BME. Il s'agit donc d'une valeur moyenne.

La variation latérale de pression au sol, à 12 heures, sur le Nord-Pas-de-Calais a été calculée de la façon suivante : mesure de la distance, en kilomètres, qui sépare deux isobares consécutives (5 hPa). Quand il n'a pas été possible de calculer cette variation latérale de pression, c'est-à-dire quand le Nord-Pas-de-Calais se trouvait dans une crête anticyclonique, au centre d'un anticyclone ou d'une dépression, il a été affecté une valeur de 1000 kilomètres. Cela peut paraître arbitraire, mais ces situations correspondent à des vents très faibles et les variations latérales de pression les plus faibles ne dépassent que rarement 900 kilomètres.

Le graphique ci-dessous montre que la vitesse moyenne du vent , en accord avec les résultats de A. Viaut (*A. Viaut, 1968*), dépend de la variation latérale de pression.



Graphique 2 : Vitesse moyenne du vent en fonction de la variation latérale de pression à Lesquin en 1984.

A ces informations collectées sur le BME, il a été adjoint des données concernant la vitesse moyenne et maximale quotidienne, le nombre d'heures de soleil et la température moyenne à Lesquin. L'ensemble de ces données ont été "saisies" sur un tableur qui a permis de faire des moyennes, de trier les informations et de tracer des graphiques.

Le travail de détermination des types de temps est assez délicat et comporte une certaine dose de subjectivité. Ainsi, pour certains types de temps, il est possible de les classer soit en AW, soit en flux d'Ouest. La détermination dépend de la finalité du travail. Ici, c'est plus la vitesse du vent qui nous intéresse que le niveau de pression; aussi, dans ce cas nous avons préféré utiliser les classes intermédiaires anticycloniques. Des regroupements ultérieurs en fonction de la pression atmosphérique permettront de comparer nos résultats à ceux d'autres auteurs. Parfois, il n'est pas possible de classer un type de temps; aussi, comme dans le travail de H.H. Lamb (*H.H. Lamb, 1972*), il y a des cas indéterminés peu nombreux (2%), où la vitesse moyenne du vent est faible, 2.6 m/s à Lesquin.

La précision des valeurs de la variation latérale de pression dépend de la qualité des informations météorologiques qui permettent de dessiner les isobares sur les cartes du BME, de l'échelle de la carte du BME, 1/30 000 000, où un millimètre représente 30 kilomètres, de l'épaisseur variable du trait représentant les isobares. Si l'on étudie un autre document météorologique quotidien, les positions des isobares ne seront pas exactement les mêmes que dans le BME, ce qui montre bien les limites de la précision des informations météorologiques utilisées dans ce travail. Il faut noter que, sur la région Nord-Pas-de-Calais, la variation latérale de pression n'est pas forcément la même dans le Boulonnais et dans l'Avesnois. La valeur régionale retenue n'est donc qu'une moyenne.

Dans le graphique ci-dessus, la variation latérale de pression a été calculée à 12 heures, tandis que la vitesse du vent a été moyennée sur 24 heures; cela peut avoir quelques incidences sur la précision de la courbe et expliquer, peut-être, l'importance du nuage de points.

Les pages suivantes présentent les différents types de temps et leurs fréquences dans la région Nord-Pas-de-Calais. Pour chaque type de temps, nous avons ajouté un exemple représentatif.

LES DIFFERENTS TYPES DE TEMPS

L'Anticyclone : A

Un anticyclone est établi sur la France ou sur les Iles Britanniques. Sur la période de 12 ans, cela représente 1026 cas sur 4383, soit un taux de 23.4%. La pression au sol à 12 heures s'élève en moyenne à 1026 hPa, voir le tableau en annexe à la page 116. La direction du vent au sol dépend de la position et de la forme de l'anticyclone. La variation latérale de pression est en général faible, 790 kilomètres, et on observe de nombreux cas où il n'est guère possible de la calculer. En conséquence, la vitesse moyenne du vent est faible, 2.9 m/s en moyenne à Lesquin. La vitesse maximale en période anticyclonique n'est pas très élevée, 18 m/s et on ne recense d'ailleurs que 6 jours de vent fort (jour où la vitesse maximale a atteint ou dépassé 16 m/s), soit un taux de 0.6% seulement. C'est par temps anticyclonique que l'ensoleillement est le plus généreux; en moyenne 5.8 heures de soleil par jour à Lesquin.

18 Août 1989, voir les cartes situées en annexe aux pages 117 et 118.

Un anticyclone couvre la France. La pression au sol à 12 heures est de 1027 hPa dans le Nord et il est impossible, d'après les informations du BME, voir la carte située en annexe à la page 117, de calculer la variation latérale de pression. La vitesse moyenne et la vitesse maximale instantanée du vent sont faibles à Lesquin : respectivement, 2.4 et 8 m/s. Les directions du vent sont variables sur la région comme le montre la carte située en annexe à la page 118. C'est une journée bien ensoleillée, 12 heures de soleil au Touquet avec des températures conformes aux moyennes saisonnières, 17°2 à Lesquin.

Les situations intermédiaires : AE, AN, ANE, ANW, AS, ASE, ASW, AW

Le Nord de la France est situé en périphérie d'un anticyclone. Les pressions sont élevées, en moyenne, 1024 hPa, mais la variation latérale de pression est plus forte que dans le cas des anticyclones, 500 kilomètres en moyenne, voir le tableau en annexe à la page 116. La vitesse du vent est donc plus élevée, 4.4 m/s, et on observe dans 7% des cas un vent fort supérieur à 16 m/s. Parmi ces 8 situations intermédiaires, ce sont dans les situations AW et ASW que l'on rencontre les vitesses moyennes les plus élevées, 4.9 et 4.8 m/s respectivement. Ces situations représentent 532 cas, soit un taux de 12.1%.

10 Mars 1990, voir les cartes situées en annexe aux pages 119 et 120.

Le Nord de la France est en périphérie Nord de l'anticyclone dont le centre est situé en Aquitaine, voir la carte située en annexe à la page 119. La pression au sol est élevée sur le Nord, 1030 hPa. La variation latérale de pression est assez forte avec une distance de 210 kilomètres entre deux isobares espacés de 5 hPa. Un vent assez fort de Sud-Ouest et d'Ouest souffle sur notre région, voir la carte située en annexe à la page 120. La vitesse moyenne atteint 9.1 m/s à Lesquin et 11.1 m/s. La vitesse maximale quotidienne atteint 15 m/s au Touquet, 17 m/s à Epinoy, 19 m/s à Boulogne et Lesquin et 23 m/s à Dunkerque. L'ensoleillement est nul au Touquet.

Le temps "cyclonique" : C

Une dépression est localisée sur le Nord de la France ou dans ses environs immédiats. Cela représente 522 cas, soit un taux de 11.9%, voir le tableau situé en annexe à la page 116. La direction des vents est variable. La variation latérale de pression n'est pas très forte, en moyenne 545 kilomètres. La vitesse moyenne du vent atteint 4.8 m/s, mais avec un écart-type et un coefficient de variation, rapport de l'écart-type à la vitesse moyenne, plus fort que dans les autres types de temps. On observe, en effet, des dépressions peu actives avec une vitesse moyenne du vent peu élevée, mais aussi des dépressions très creusées avec des vitesses de vent élevées. La pression moyenne est de 1004 hPa avec une valeur minimale de 968 hPa observée le 26 Février 1989. On observe dans 25% des cas un vent fort, supérieur ou égal à 16 m/s et la vitesse maximale en situation cyclonique a atteint 37 m/s. L'ensoleillement est peu important à Lesquin, 2.7 heures de soleil par jour.

On peut associer une composante aux types de temps cycloniques dans 125 cas. Ainsi, il y a 13 cas de types de temps cycloniques avec une composante Est, notée CE, 10 cas notés CN, 4 CNE, 9 CNW, 21 CS, 3 CSE, 26 CSW et 39 CW. Devant la faiblesse des échantillons, il n'est guère possible de faire des moyennes qui aient une signification. Aussi, nous avons incorporé ces types de temps cycloniques avec composante aux temps cycloniques.

8 Novembre 1989, voir les cartes situées en annexe aux pages 121 et 122.

Une dépression est centrée sur le Sud de l'Angleterre. la variation latérale de pression est forte, entre 120 et 150 kilomètres, voir la carte située en annexe à la page 121. La vitesse du vent au sol est forte : 8 à 8.5 m/s en moyenne à Lesquin, Le Touquet et Epinoy, 9.8 m/s à Boulogne et 12.6 m/s à Dunkerque. Les vitesses maximales instantanées dépassent 16 m/s et atteignent 24 m/s à Dunkerque, 25 m/s au Touquet et 31 m/s à Boulogne. La direction du vent est orientée au Sud comme le montre la carte située en annexe à la page 122. L'ensoleillement est quasiment nul : 1/2 heure de soleil à Lesquin comme au Touquet; par contre, les températures sont assez élevées pour la saison, 10° à Lesquin.

Le flux de Nord : N

La présence d'une dépression centrée sur la Scandinavie ou sur la Pologne et d'un anticyclone situé sur l'Atlantique avec une limite orientale méridienne ou sub-méridienne entraîne un flux de Nord sur la région Nord-Pas-de-Calais. Sur la période de 12 ans, le flux de Nord est apparu 224 fois, soit un taux d'apparition de 5.1%, voir le tableau situé en annexe à la page 116. La pression au sol à 12 heures est d'environ 1015 hPa. La variation latérale de pression est assez forte, en moyenne 480 kilomètres. Pour ce type de temps, la vitesse moyenne du vent à Lesquin est relativement modérée, 4.3 m/s, soit une valeur proche de la vitesse moyenne annuelle. Dans 14% des cas, contre 25% pour l'ensemble des flux, on observe un vent fort. La vitesse maximale instantanée observée pour le flux de Nord est de 26 m/s. Ce type de temps est peu ensoleillé, 3.2 heures de soleil par jour, en moyenne, à Lesquin. Il entraîne une baisse des températures et apporte des giboulées au printemps.

7 Février 1983, voir les cartes situées en annexe aux pages 123 et 124.

Un anticyclone de 1040 hPa, centré au Sud de l'Islande et à l'Ouest de l'Ecosse et une dépression de 995 hPa située sur l'Allemagne et la Pologne crée un flux de Nord sur notre région, voir la carte située en annexe à la page 123. La pression au sol, à 12 heures, est d'environ 997 hPa et la variation latérale de pression est de 420 kilomètres. Celle-ci augmente vers la Manche, aussi les vitesses de vent y sont plus élevées qu'à l'intérieur de la région : 6.5 m/s à Boulogne, 10.1 m/s à Dunkerque, contre 3.5 et 4.4 m/s à Lesquin et Epinoy. De même, les vitesses maximales instantanées sont moins élevées à l'intérieur que sur le littoral : 10 m/s à Lesquin et Epinoy contre 17 m/s à Boulogne et Dunkerque. Au cours de cette journée, le vent a soufflé du Nord, voir la carte située en annexe à la page 124. L'ensoleillement est très faible : 1.4 et 1.1 heures de soleil à Lesquin et au Touquet. La température est fraîche, voire froide, 2° à Lesquin et des chutes de neige se sont produites dans la région.

Le flux de Nord-Est : NE

L'anticyclone centré sur la Scandinavie ou sur le Nord des Iles Britanniques dirige sur notre région un flux de Nord-Est. En hiver ce type de temps est synonyme de grand froid. Le flux de Nord-Est est apparu 111 fois sur la période d'étude, soit un taux de 2.5%, voir le tableau situé en annexe à la page 116. La pression au sol, à 12 heures, est d'environ 1015 hPa. La variation latérale de pression est assez forte, en moyenne 460 kilomètres. La vitesse moyenne du vent à Lesquin est modérée, 4.2 m/s. Dans seulement 6% des cas, contre 25% pour l'ensemble des flux, on observe un vent fort supérieur ou égal à 16 m/s. La vitesse maximale instantanée, pour le flux de Nord-Est, est de 27 m/s. C'est un type de temps assez ensoleillé, en moyenne 5.1 heures de soleil par jour à Lesquin, et froid.

10 Avril 1986, voir les cartes situées en annexe aux pages 125 et 126.

Un anticyclone de 1040 hPa centré au Nord-Ouest de l'Ecosse et une dépression de 995 hPa au Nord de la Roumanie entraînent un flux de Nord-Est sur notre région, voir la carte située en annexe à la page 125. La pression au sol, à 12 heures, est d'environ 1016 hPa sur le Nord-Pas-de-Calais et la variation latérale de pression est forte, 120 à 200 kilomètres. Un vent fort de Nord-Est souffle sur le Nord-Pas-de-Calais : 9.3 m/s à Lesquin et 14.5 m/s à Dunkerque, voir la carte située en annexe à la page 126. Les vitesses maximales sont comprises entre 18 et 21 m/s. L'ensoleillement est faible, 3.8 heures de soleil à Lesquin. Les températures sont fraîches pour la saison : 4°8 et 5°7 à Dunkerque et Lesquin. Il y a quelques précipitations sous forme de chutes de neige.

Le flux d'Est : E

Un anticyclone centré sur la Scandinavie ou sur la Russie dirige sur notre région un flux d'Est. Le flux d'Est est apparu 196 fois sur la période 1979-1990, soit un taux de 4.5%, voir le tableau situé en annexe à la page 116. La pression au sol, à 12 heures, est d'environ 1015 hPa. La variation latérale de pression est assez forte, en moyenne 470 kilomètres. La vitesse moyenne du vent à Lesquin est modérée, 4.3 m/s. Dans seulement 5% des cas, on observe un vent fort, supérieur ou égal à 16 m/s. La vitesse maximale instantanée n'a été que de 19 m/s. Ce type de temps présente beaucoup de similitudes avec le flux de Nord-Est avec lequel il peut être parfois confondu. La seule différence notable est la direction des vents au sol. L'ensoleillement est généreux avec, en moyenne à Lesquin, 5.2 heures de soleil par jour contre 3 heures par jour pour le flux de Nord-Est. En hiver le flux d'Est apporte le froid, en été un air sec.

6 Juillet 1989; voir les cartes situées en annexe aux pages 127 et 128.

Un anticyclone de 1025 hPa centré sur le Danemark et le Sud de la Suède dirige sur notre région un flux modéré d'Est, voir la carte située en annexe à la page 127. La pression au sol, à 12 heures, est d'environ 1018 hPa et la variation latérale de pression n'est pas très importante, 450 kilomètres. Le vent souffle modérément de l'Est : 3.3 m/s en moyenne à Lesquin, 4 m/s à Boulogne, voir la carte située en annexe à la page 128. Les vitesses maximales observées durant cette journée sont faibles, entre 8 et 12 m/s. C'est une chaude journée avec 23°5 de température à Lesquin, avec un ensoleillement assez généreux, 9 heures de soleil au Touquet, mais avec des averses orageuses : on a relevé 21.5 mm d'eau à Rety, 17 mm à St-Omer, 13 mm à Watten; par contre, dans l'Est et le Sud-Est de la région, il n'a pratiquement pas plu.

Le flux de Sud-Est : SE

Une dépression située sur la Méditerranée occidentale ou sur l'Atlantique proche de l'Espagne et un anticyclone centré sur l'Europe de l'Est entraînent un flux de Sud-Est sur notre région. En été, le flux de Sud-Est nous apporte de l'air chaud. Le flux de Sud-Est est apparu 146 fois durant la période d'étude, soit un taux de 3.3%, voir le tableau situé en annexe à la page 116. La pression au sol est d'environ 1013 hPa et la variation latérale de pression est modérée et est plus faible que pour les autres flux, environ 560 kilomètres. Aussi, la vitesse moyenne du vent est assez faible, 3.5 m/s en moyenne à Lesquin, avec peu de vents forts. Dans 2% des cas de flux de Sud-Est, on observe un vent supérieur ou égal à 16 m/s. Par contre, l'ensoleillement est généreux, 5.2 heures de soleil par jour en moyenne à Lesquin.

19 Novembre 1989, voir les cartes situées en annexe aux pages 129 et 130.

Un anticyclone de 1030 hPa centré sur la Biélorussie et une dépression de 975 hPa située au large de l'Espagne dirigent sur le Nord-Pas-de-Calais un flux de Sud-Est, voir la carte située en annexe à la page 129. La pression au sol, à 12 heures, est d'environ 1012 hPa et la variation latérale de pression est de 450 kilomètres sur le Nord-Pas-de-Calais. Le vent souffle modérément du Sud-Est : 3.9 m/s en moyenne à Lesquin, 6 m/s à Boulogne, les vitesses maximales de la journée sont faibles, entre 8 et 11 m/s, voir la carte située en annexe à la page 130. Les températures sont conformes aux moyennes saisonnières, 6°8 à Lesquin et 7°3 à Dunkerque. C'est une belle journée, sans pluie, avec un ensoleillement important, 6.4 heures de soleil à Lesquin.

Le flux de Sud : S

Un anticyclone situé sur l'Europe de l'Est et une dépression localisée dans l'Atlantique entraînent un flux de Sud sur notre région. Ce flux nous apporte de l'air chaud. Il est parfois difficile de le distinguer du flux de Sud-Est. Le flux de Sud est apparu 216 fois durant la période 1979-1990, soit un taux de 4.9%, voir le tableau situé en annexe à la page 116. La pression au sol est d'environ 1012 hPa et la variation latérale de pression est assez forte, environ 480 kilomètres. La vitesse moyenne du vent est modérée, 4.2 m/s, avec peu de vents forts. Dans environ 8% des cas de flux de Sud, on rencontre une vitesse maximale instantanée supérieure ou égale à 16 m/s. L'ensoleillement est assez généreux, 4.6 heures de soleil par jour en moyenne à Lesquin, et les températures sont généralement élevées.

16 Octobre 1990, voir les cartes situées en annexe aux pages 131 et 132.

L'anticyclone de 1027 hPa centré sur l'Ukraine et la Russie et la dépression de 995 hPa localisée au Nord de la Galice créent un flux de Sud sur la France, voir la carte située en annexe à la page 131. La pression au sol est d'environ 1015 hPa et la variation latérale de pression de 390 kilomètres. Au sol, le vent souffle modérément du secteur Sud-Est à Sud : 4.5 m/s à Lesquin, 5.8 m/s à Boulogne, voir la carte en annexe à la page 132. Les vitesses maximales instantanées sont comprises entre 10 m/s à Epinoy et Dunkerque et 16 m/s à Boulogne. Les températures sont douces pour la saison, 16°3 à Lesquin et la journée est bien ensoleillée : 9.7 heures de soleil au Touquet. Quelques faibles précipitations, moins de 1 millimètre d'eau, sont tombées par endroit sur la région.

Le flux de Sud-Ouest : SW

Une dépression centrée sur les Iles Britanniques entraîne sur notre région un flux de Sud-Ouest. Il s'agit, en général, d'un temps pluvieux. Le flux de Sud-Ouest est apparu 344 fois durant la période étudiée, soit un taux de 7.8%, voir le tableau situé en annexe à la page 116. La pression au sol est d'environ 1011 hPa et la variation latérale de pression est forte, environ 380 kilomètres. Aussi, la vitesse moyenne du vent à Lesquin est élevée, 5.7 m/s, avec une grande fréquence de vents forts. Dans 37% des cas de flux de Sud-Ouest, la vitesse maximale instantanée est égale ou supérieure à 16 m/s à Lesquin; la vitesse maximale observée a été de 30 m/s. L'ensoleillement est faible, en moyenne 3.3 heures de soleil par jour à Lesquin.

15 Octobre 1983, voir les cartes situées en annexe aux pages 133 et 134.

Une dépression très creusée, 955 hPa, à l'Ouest de l'Ecosse, et un anticyclone de 1030 hPa en Ukraine créent un flux de Sud-Ouest sur la moitié Nord de la France, voir la carte située en annexe à la page 133. La pression au sol est d'environ 1007 hPa et la variation latérale de pression est forte, 135 kilomètres environ. Aussi, la vitesse moyenne du vent est forte : 9.9 m/s à Lesquin et 13 m/s à Boulogne. Les vitesses maximales instantanées sont fortes : 21 m/s au Touquet, 28 m/s à Lesquin et 32 m/s à Boulogne, voir la carte située en annexe à la page 134. L'ensoleillement est faible; 1.3 heure de soleil à Lesquin et 0.4 heure au Touquet, et les précipitations sont abondantes : de 6 à 37 millimètres d'eau dans la région Nord-Pas-de-Calais.

Le flux d'Ouest : W

Une dépression centrée sur l'Atlantique Nord circule d'Ouest en Est au Nord d'un anticyclone positionné sur l'Afrique du Nord ou sur les Açores. Plusieurs trajectoires ont été mises en évidence par Pédelaborde. La trajectoire W1, très régulière le long de l'année, correspond au passage d'une dépression au niveau de l'Islande. La trajectoire W2, fréquente en été, circule du Nord de l'Ecosse au Sud de la Suède, tandis que la trajectoire W4, assez fréquente au printemps et en été, circule au Nord de la France. C'est un temps pluvieux et qui a tendance à adoucir les températures en hiver et à les rafraîchir en été. Le flux d'Ouest est très fréquent, 16.5%, soit 724 cas sur la période 1979-1990, voir le tableau situé en annexe à la page 116. La pression au sol est de l'ordre de 1012 hPa et la variation latérale de pression est forte, environ 370 kilomètres. Aussi, la vitesse moyenne du vent est forte à Lesquin, 6.1 m/s, avec une grande fréquence de vents forts. Dans 40% des cas, on observe des vents forts supérieurs ou égaux à 16 m/s. La vitesse maximale instantanée a été de 36 m/s. L'ensoleillement est faible, en moyenne 3.5 heures de soleil par jour à Lesquin.

24 Janvier 1990, voir les cartes situées en annexe aux pages 135 et 136.

La présence d'un anticyclone sur les Açores et d'une dépression très creusée, 950 hPa, sur l'Islande crée un flux rapide d'Ouest sur la France, voir la carte située en annexe à la page 135. La pression au sol est d'environ 1007 hPa et la variation latérale de pression est d'environ 210 kilomètres. Le vent souffle fortement du secteur Sud-Ouest à Ouest : 8.1 m/s à Lesquin, 10.8 m/s à Dunkerque et 11.9 m/s à Boulogne, voir la carte située en annexe à la page 136. Les vitesses maximales de cette journée sont élevées : 20 m/s à Lesquin, Epinoy et Dunkerque, 26 m/s au Touquet et 30 m/s à Boulogne. Les températures sont douces pour la saison : 6° à Lesquin et 7°8 à Dunkerque. C'est une journée peu ensoleillée, 3.9 heures de soleil au Touquet, et pluvieuse : il est tombé de 2 à 26 millimètres d'eau sur la région Nord-Pas-de-Calais.

Le flux de Nord-Ouest : NW

L'anticyclone sur l'Atlantique Nord a une bordure orientale submérienne, et la présence d'une dépression sur la Scandinavie entraînent un flux de Nord-Ouest sur la région Nord-Pas-de-Calais. Le flux de Nord-Ouest est apparu 243 fois sur la période d'étude, soit un taux de 5.5%, voir le tableau situé en annexe à la page 116. La pression au sol est d'environ 1014 hPa et la variation latérale de pression est forte, environ 410 kilomètres. En conséquence, la vitesse moyenne du vent est assez élevée, 5.4 m/s à Lesquin, avec une grande fréquence de vents forts. Dans 28% des cas, on observe des vitesses maximales instantanées supérieures ou égales à 16 m/s. La vitesse maximale instantanée a atteint 38 m/s. L'ensoleillement est modéré mais supérieur à ce qu'il est dans les flux de Nord, d'Ouest et de Sud-Ouest, avec en moyenne 4.3 heures de soleil par jour à Lesquin. C'est aussi un temps où les précipitations tombent sous forme d'averses.

6 Novembre 1979, voir les cartes situées en annexe aux pages 137 et 138.

Un anticyclone de 1025 hPa, centré sur les Açores et la présence d'une dépression sur la Scandinavie créent un flux de Nord-Ouest sur la France, voir la carte située en annexe à la page 137. La pression au sol est d'environ 1000 hPa et la variation latérale de pression est forte, environ 160 kilomètres. Aussi, le vent souffle fortement du secteur Nord-Ouest : 6.1 m/s à Lesquin, 8.4 m/s à Dunkerque, 12.3 m/s à Boulogne, voir la carte située en annexe à la page 138. Les vitesses maximales instantanées sont supérieures à 16 m/s : 18 m/s à Lesquin, 21 m/s à Epinoy et Le Touquet et 24 m/s à Boulogne. L'ensoleillement est très faible à Lesquin, 1.3 heure de soleil, et inexistant au Touquet. C'est une journée très pluvieuse, de 4 à 35 millimètres d'eau sont tombés sur la région, mais douce pour la saison, 10°4 à Lesquin.

FREQUENCE DES DIFFERENTS TYPES DE TEMPS

Le tableau ci-dessous présente les fréquences et les vitesses moyennes du vent à Lesquin pour chaque type de temps. On trouvera des informations complémentaires à ce sujet dans le tableau situé en annexe à la page 116.

| Types de temps sur le Nord-Pas-de-Calais d'après les données du BME | Fréquence | Vitesse moyenne du vent à Lesquin |
|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------------------------------|
| Anticyclone (A) | 23.4 % | 2.9 m/s |
| AN | 1.1 % | 3.7 m/s |
| ANE | 0.9 % | 4.6 m/s |
| AE | 2.3 % | 4.5 m/s |
| ASE | 0.8 % | 3.2 m/s |
| AS | 1.0 % | 3.7 m/s |
| ASW | 1.0 % | 4.8 m/s |
| AW | 3.7 % | 4.9 m/s |
| ANW | 1.2 % | 3.8 m/s |
| Total Anticyclone | 35.5 % | 3.4 m/s |
| Cyclonique (C) | 9.1 % | 4.4 m/s |
| Cyclonique avec une composante géographique (CN, CNE, CE, CSE, CS, CSW, CW, CNW) | 2.9 % | 6.0 m/s |
| Total Cyclonique | 11.9 % | 4.8 m/s |
| Flux de Nord (N) | 5.1 % | 4.3 m/s |
| Flux de Nord-Est (NE) | 2.5 % | 4.2 m/s |
| Flux d'Est (E) | 4.5 % | 4.3 m/s |
| Flux de Sud-Est (SE) | 3.3 % | 3.5 m/s |
| Flux de Sud (S) | 4.9 % | 4.2 m/s |
| Flux de Sud-Ouest (SW) | 7.8 % | 5.7 m/s |
| Flux d'Ouest (W) | 16.5 % | 6.1 m/s |
| Flux de Nord-Ouest (NW) | 5.5 % | 5.4 m/s |
| Total des flux | 50.3 % | 5.2 m/s |
| Total des temps perturbés | 62.2 % | 5.1 m/s |
| Indéterminés (U) | 2.2 % | 2.6 m/s |
| TOTAL | 100.0% | 4.4 m/s |

Tableau 12 : Fréquence et vitesse moyenne des différents types de temps dans la région Nord-Pas-de-Calais.

Les types de temps perturbés, flux et temps cycloniques, sont beaucoup plus fréquents que les types de temps anticycloniques : 62% contre 35%. Les flux avec une composante Ouest, c'est-à-dire les flux de Sud-Ouest, d'Ouest et de Nord-Ouest, représentent 30% des types de temps, ce qui explique la prédominance des vents de secteur Sud-Ouest et Ouest dans la région Nord-Pas-de-Calais.

Les vitesses de vent les plus élevées se rencontrent dans les types de temps perturbés, notamment dans les flux d'Ouest (6.1 m/s), de Sud-Ouest (5.7 m/s), de Nord-Ouest (5.4 m/s), dans les types de temps cycloniques (4.8 m/s), mais aussi dans les situations anticycloniques intermédiaires AW (4.9 m/s), ASW (4.8 m/s) et dans une moindre mesure dans les types de temps ANE (4.6 m/s) et AE (4.5 m/s).

Par contre, les vitesses les plus faibles se rencontrent dans les types de temps anticycloniques "purs" (2.9 m/s) ou avec une composante Sud-Est (ASE : 3.2 m/s), dans les flux de Sud-Est (3.5 m/s) ou dans les situations indéterminées (2.6 m/s).

Nous présentons ci-dessous un tableau où figurent les résultats de différents travaux menés par Pédelaborde pour la région parisienne (1926-1951), Cordier (*Y. Cordier, 1965*) pour le Nord (1958-1964) et Kouame (*K. Kouame, 1983*) pour le Nord (1980-1982).

| | PEDELABORDE | CORDIER | KOUAME |
|----------------------------|-------------|---------|--------|
| Anticyclones | 42.0% | 30.0% | 31.6% |
| Types de temps cycloniques | 58.0% | 70.0% | 68.4% |
| Cyclonique "pur" | | | 13.9% |
| Flux d'Ouest | 31.0% | 35.8% | 31.0% |
| Flux de Nord-Ouest | 13.0% | 10.1% | 6.8% |
| Flux de Nord | 3.2% | 4.8% | 7.3% |
| Flux de Nord-Est | 1.0% | 5.6% | |
| Flux d'Est | | | 5.0% |
| Flux de Sud-Est | 1.3% | 1.0% | |
| Flux de Sud | | | 4.4% |
| Flux de Sud-Ouest | 8.2% | 12.7% | |

Tableau 13 : Fréquence des différents types de temps dans la région parisienne et dans la région Nord-Pas-de-Calais.

Nos résultats concordent assez bien avec ceux de ces 3 auteurs, en ce qui concerne les 2 grandes classes de types de temps, c'est-à-dire, anticyclonique et cyclonique. On observe une prédominance des types de temps perturbés ou cycloniques : 58% pour Pédelaborde, 68% pour Kouame et 70% pour Cordier, 62% pour la période d'étude 1979-1990. Pour les types de temps cyclonique "pur", nous trouvons 11.9% contre 13.9% pour Kouame.

Par contre pour les différents flux, il n'est pas toujours possible de les comparer, car les autres auteurs n'ont pas utilisé la même classification que H.H. Lamb. Ainsi, nous trouvons une fréquence de 16.5% pour les flux d'Ouest, tandis que pour les autres auteurs précités, celle-ci est comprise entre 31 et 35.8%. De même, pour le flux de Nord-Ouest, la fréquence est de 5.5% contre 10.1 et 13% pour Y. Cordier et Pédelaborde. La valeur du flux de Sud-Ouest, 7.8% est

voisine de celle de Pédelaborde, 8.2%, mais est inférieure à ce qu'avait trouvé Y. Cordier, 12.7%. Pour le flux de Nord, nos résultats, 5.1%, ne sont pas très éloignés de ceux de Y. Cordier, 4.8%.

L'étude des fréquences d'apparition des principales catégories de type de temps sur les 12 années montrent une certaine fluctuation au cours du temps, voir le tableau situé en annexe à la page 139.

Le nombre de situations anticycloniques varie de 98 à 150 par an, la pression moyenne annuelle varie peu, 1023.9 à 1026.3 hPa. La variation latérale de pression varie de 724 à 630 kilomètres. La vitesse moyenne est comprise entre 3.1 et 3.7 m/s, mais, pour les situations anticycloniques sans composantes elle varie de 2.5 à 3.5 m/s.

Le nombre de situations cycloniques varie aussi d'une année à l'autre, de 29 à 60 par an. La pression au sol est comprise entre 1002.3 et 1007.1 hPa. Par contre, la variation latérale de pression varie beaucoup d'une année à l'autre, de 432 à 663 kilomètres, ce qui explique l'importante fluctuation des vitesses moyennes, de 3.8 à 5.8 m/s.

Le nombre de jours où on observe un flux varie de 164 à 210 par an. La pression moyenne annuelle varie de 1011.1 à 1014 hPa, et la variation latérale de pression est toujours forte, 379 à 483 kilomètres, tout comme la vitesse moyenne du vent, 4.5 à 6 m/s.

Les vitesses moyennes annuelles varient essentiellement en fonction du nombre de jours de flux et surtout en fonction de leurs vitesses moyennes. Ainsi, la faible vitesse moyenne de l'année 1979, 4.3 m/s, s'explique par une vitesse moyenne des flux très faible, 4.7 m/s, et la forte vitesse moyenne de l'année 1986, 5.0 m/s, s'explique par la forte variation latérale de pression, 397 kilomètres, et donc par la forte vitesse moyenne des flux, 6.0 m/s.

Au cours de l'année, la fréquence d'apparition des principaux types de temps fluctue. Les anticyclones sont plus fréquents en été et les flux plus nombreux en automne et en hiver, voir le tableau situé en annexe à la page 139.

Les variations latérales de pression et donc la vitesse moyenne de ces types de temps varient aussi au cours de l'année.

Ainsi, pour les types de temps cycloniques, la variation latérale de pression est plus forte en hiver qu'en été, ce qui veut dire que les dépressions sont plus marquées en saison froide qu'en été. Aussi, les vitesses moyennes sont elles plus importantes entre Décembre et Avril, 5 à 6.4 m/s, qu'en été, 3.7 à 4.2 m/s.

On peut faire la même remarque pour les situations de flux : la vitesse hivernale est supérieure à 6 m/s, tandis que la moyenne estivale est de l'ordre de 4.2 m/s.

Dans une moindre mesure, on observe cette tendance pour les situations anticycloniques : 3.7 m/s en hiver contre 3.1 m/s en été.

Pour chaque direction nous avons calculé la vitesse moyenne du vent. Les résultats sont consignés sous la forme de trois tableaux situés en annexe aux pages 140 et 141.

Les directions des secteurs Sud-Sud-Ouest à Ouest, 20 à 28, sont celles où la vitesse du vent est la plus forte. Dans ces directions, la vitesse moyenne du vent est supérieure à 7 m/s à Boulogne et Dunkerque, supérieure à 5.8 m/s à Epinoy et dépasse 5.4 m/s à Lesquin et au Touquet. C'est dans les directions des secteurs Est et Sud-Est, 8 à 16, que les vitesses du vent sont les plus faibles :

- * 3.1 m/s au Touquet dans la direction 14,
- * 2.7 m/s à Lesquin dans la direction 12,
- * 3.6 et 3.7 m/s à Epinoy et Boulogne dans les directions 12 et 10,
- * 4.3 m/s à Dunkerque dans la direction 10.

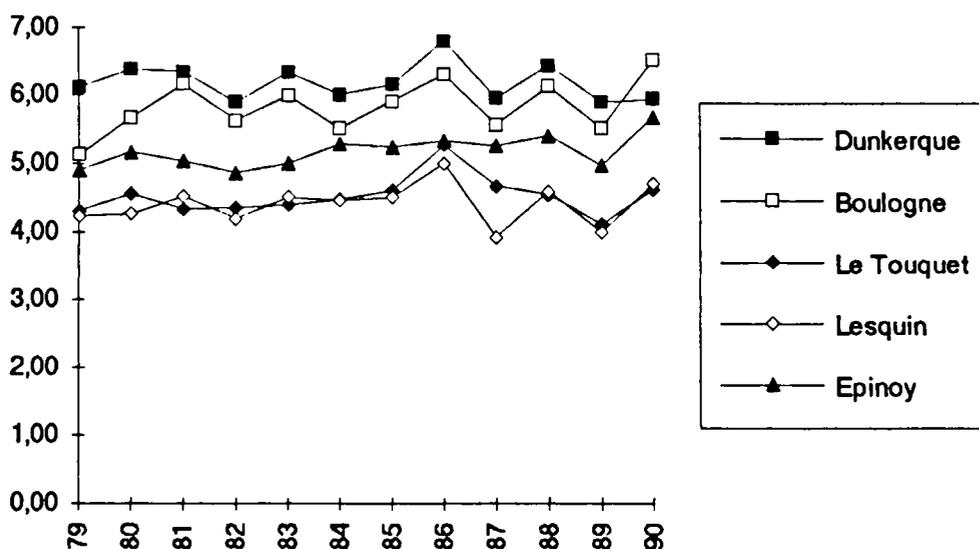
Bien que la vitesse moyenne annuelle soit moins forte à Boulogne qu'à Dunkerque, dans les directions Sud, Ouest et Nord-Ouest la vitesse est supérieure à Boulogne. Une moins grande rugosité dans ces directions explique probablement cette supériorité. La rugosité est faible à Dunkerque dans les directions 32, 34, 36, 2, 4, 6, car le vent vient de la mer; aussi les vitesses moyennes y sont plus élevées que dans toutes les autres stations de la région Nord-Pas-de-Calais. Inversement, il y a une forte rugosité à Boulogne dans la direction Est; la vitesse moyenne y est donc faible, 3.7 à 4.1 m/s.

**LES VARIATIONS TEMPORELLES
DE LA
VITESSE DU VENT
DANS LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS**

LES VARIATIONS ANNUELLES DE LA VITESSE DU VENT

Les vitesses de vent fluctuent d'une année à l'autre, comme le montrent le graphique ci-dessous ainsi que le tableau et le graphique situés en annexe à la page 142.

On observe notamment une alternance d'années venteuses et d'années peu venteuses à partir de l'année 1985. Cependant, les écarts maxima autour de la valeur moyenne ne sont pas très élevés, de l'ordre de 10 à 17% : 10% à Dunkerque et Epinoy, 12% à Boulogne, 14% à Lesquin et 17% au Touquet.



Graphique 3 : Variations de la vitesse moyenne annuelle, en m/s.

Les années les plus venteuses sont 1986, 1988 et 1990 et les plus calmes 1979, 1982 et 1989, voir aussi à ce sujet le graphique situé en annexe à la page 142.

Le Nord est une région marquée par une forte variabilité des précipitations et des températures. Par contre, la variabilité est plus modérée pour le vent, comme l'indiquent les valeurs des coefficients de variation (rapport de l'écart-type à la moyenne) comprises entre 0.05 et 0.07 (voir le tableau situé en annexe à la page 143), contre 0.09 à 0.12 pour les précipitations.

La vitesse du vent est donc un paramètre météorologique relativement constant à l'échelle annuelle.

Si l'on compare maintenant, pour la période 1979-1990, les valeurs moyennes annuelles maximales et minimales de la vitesse du vent, on observe que le rapport entre la valeur maximale et la valeur minimale est compris entre 1.16 à Dunkerque et 1.28 au Touquet (voir le tableau situé en annexe à la page 143).

L'amplitude, différence entre la moyenne annuelle maximale et la moyenne annuelle minimale est plus faible à Epinoy (0.81 m/s) qu'à Lesquin, autre station de l'intérieur (1.08 m/s). Pour les stations maritimes, elle est comprise entre 0.92 m/s (à Dunkerque) et 1.38 m/s (à Boulogne). Les vitesses moyennes sont donc plus constantes à Dunkerque et Epinoy que dans les autres stations.

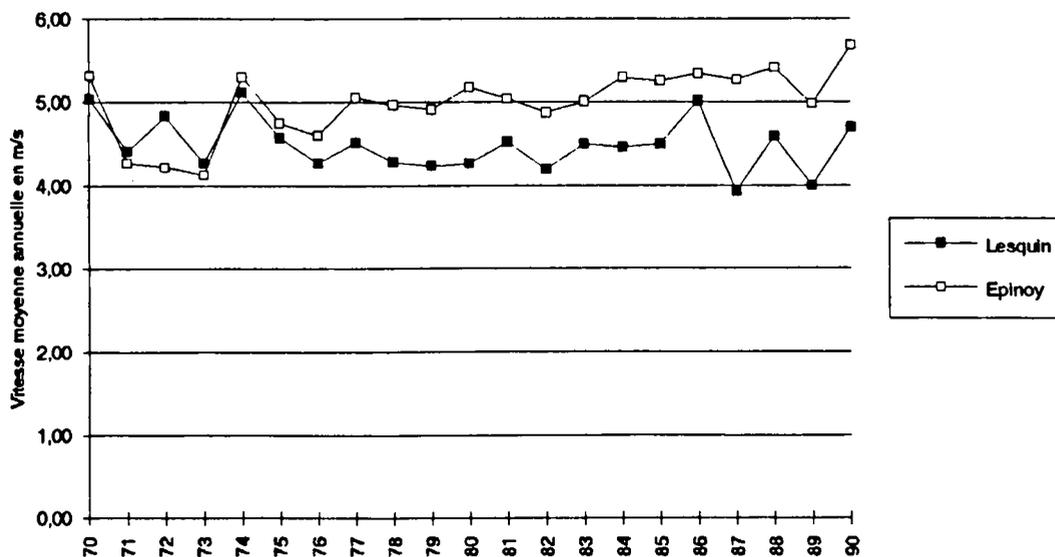
Le graphique montrant les variations relatives de la vitesse moyenne annuelle, situé en annexe à la page 142, met en évidence le fait que toutes les stations n'évoluent pas de la même façon. A Epinoy, l'évolution de la vitesse moyenne est différente de celle des autres stations. Alors que 1986 est une année très venteuse pour les autres stations, on n'observe pas une telle augmentation par rapport à l'année précédente à Epinoy. De même, l'année 1987 est beaucoup moins venteuse que l'année 1986, sauf à Epinoy où la baisse de la valeur moyenne est très faible par rapport à l'année précédente. A Dunkerque en 1990, la vitesse moyenne annuelle est inférieure à la vitesse moyenne sur 12 ans alors que l'on observe le phénomène inverse pour les autres stations.

Si l'on applique le test de Spearman (voir le tableau situé en annexe à la page 144), on remarque deux groupes de stations : Boulogne et Lesquin d'un côté et de l'autre côté, Le Touquet, Dunkerque et Epinoy. Les stations du premier groupe ont un ordre de classement voisin, tandis que les stations du deuxième groupe ont un ordre de classement très différent de celui des 2 premières stations. Les stations d'Epinoy, de Dunkerque et du Touquet ont un comportement différent de celui des 2 autres stations. Pour Dunkerque, la faible valeur de 1990 explique à elle seule le résultat médiocre au test de Spearman. Pour les 11 autres années, l'évolution de la vitesse moyenne du vent suit l'allure des autres stations.

ETUDE DES VARIATIONS ANNUELLES DES VITESSES DU VENT POUR LA PERIODE 1970-1990 A LESQUIN ET EPINOY

Pour les stations de Lesquin et d'Epinoy, nous disposons de données remontant à 1970, effectuées 8 fois par jour, moyennées sur 10 minutes et mesurées dans les mêmes conditions, même hauteur et même emplacement. Aussi, nous pouvons étudier les variations annuelles sur la période 1970-1990, c'est-à-dire sur 21 années.

Le graphique ci-après représente la variation des vitesses annuelles des 2 stations pour la période 1970-1990.



Graphique 4 : Variation des vitesses annuelles de Lesquin et d'Epinoy entre 1970 et 1990.

Pour la période 1970-1979, les deux stations avaient une vitesse moyenne relativement identique; l'écart entre les deux stations n'était que de 0.19 m/s. Durant la période 1980-1990, l'écart entre les deux stations s'est accru et a atteint 0.78 m/s, voir les tableaux situés en annexe à la page 145.

A Epinoy, on observe une forte augmentation entre 1972 et 1974, puis une légère, mais constante augmentation depuis lors. A Lesquin, on observe une légère augmentation de 1972 à 1974, puis une baisse de 1974 à 1979, de nouveau une augmentation entre 1979 et 1985, puis une alternance d'années ventées et d'années moins ventées.

Comme on peut l'observer, les deux stations ont vu leur vitesse moyenne annuelle évoluer de façon divergente. Celle de Lesquin diminuait de 0.13 m/s (comparaison entre les périodes 1970-1979 et 1980-1990). On peut expliquer cette légère baisse par l'augmentation de la rugosité : par exemple, en 1988, une nouvelle tour de contrôle de 27 mètres de hauteur a été construite à 300 mètres de l'anémomètre, en supplément de celle déjà existante. A Epinoy, la vitesse moyenne a augmenté de 4.75 à 5.21 m/s, c'est-à-dire de 0.46 m/s. Aucune explication n'a pu être fournie par MétéoFrance.

A Epinoy, il semble que les vitesses moyennes du vent ont tendance à augmenter.

Jusqu'en 1973, la vitesse moyenne annuelle du vent des deux stations étaient relativement identiques; elle était même parfois plus élevée à Lesquin qu'à Epinoy. A partir de 1974, la vitesse moyenne a toujours été plus importante à Epinoy. L'écart entre les deux stations a toujours dépassé 0.5 m/s depuis 1977, sauf en 1986, année très venteuse, où cet écart est retombé à 0.34 m/s. L'écart maximum observé a même atteint 1.33 m/s en 1987, ce qui est une valeur importante. En lissant les courbes des deux stations, l'écart entre les courbes est encore plus marqué, voir le graphique situé en annexe à la page 145.

De 0.33 à Lesquin, pour la période 1970-1979, la valeur de l'écart-type passe à 0.31 pour la période 1980-1990, tandis qu'à Epinoy, la chute est plus importante : de 0.43 à 0.23. Il n'y a pas d'évolution des valeurs du coefficient de variation à Lesquin, par contre à Epinoy il diminue, de 0.09 à 0.04.

Si l'on compare maintenant, pour la période 1970-1979, les valeurs moyennes annuelles maximales et minimales de la vitesse du vent, on observe que le rapport entre la valeur maximale et la valeur minimale est de 1.29 à Epinoy et de 1.21 à Lesquin.

Si on étudie l'ordre décroissant des rangs des deux stations en utilisant celui de Lesquin comme référence, on obtient un coefficient de corrélation de Spearman de 0.44 pour la période 1970-1990, voir l'ordre des rangs décroissants d'Epinoy et de Lesquin sur le tableau situé en annexe à la page 146. Le mauvais coefficient de corrélation s'explique essentiellement par la différence de position des années 1972, 1975 et 1987.

L'étude des rangs montre et confirme les différences qui existent entre les stations de Lesquin et d'Epinoy.

On peut aussi mettre en évidence la divergence entre les deux stations en observant la position de l'année la plus venteuse : il s'agit de 1974 pour Lesquin, alors que pour Epinoy, il s'agit de 1990. L'année la moins venteuse se situe en 1987 pour Lesquin et en 1973 pour Epinoy. On peut noter, d'ailleurs, que 1987 est classé en septième position à Epinoy.

Le coefficient de corrélation de Spearman, calculé entre l'ordre chronologique des valeurs annuelles et leur classement en ordre croissant, montre que l'on peut admettre l'hypothèse d'une tendance à l'augmentation de la vitesse du vent à Epinoy, tandis qu'à Lesquin, aucune tendance de ce genre ne se dégage, comme le montre le tableau situé en annexe à la page 146.

ETUDE DES VARIATIONS ANNUELLES DE LA VITESSE DU VENT SUR UNE LONGUE PERIODE A LESQUIN

L'existence de séries de longue durée de la vitesse du vent, supérieures à 50 ans, sont rares. Quand les données existent, elles proviennent généralement de différents instruments, la hauteur de l'anémomètre a changé, le site a pu être modifié par l'urbanisation et les méthodes de calcul de la vitesse moyenne ont parfois changé.

La variabilité de la vitesse moyenne du vent sur de longues périodes a été étudiée au Royaume-Uni et au Danemark (*J.P. Palutikof, X. Guo, J.A. Halliday, 1991 et S. Frandsen, E. L. Petersen, 1993*). Le tracé de la vitesse moyenne annuelle montre de grandes fluctuations; ainsi, la vitesse moyenne annuelle à Southport (Royaume-Uni) a varié de 5.2 à 7.3 m/s entre 1898 et 1954.

La station météorologique de Lesquin mesure la vitesse du vent depuis Novembre 1944. On dispose donc de 46 années de mesures.

Le tableau ci-dessous montre tous les changements qui ont affecté les mesures de la vitesse du vent à Lesquin :

| | Changement d'emplacement du pylône anémométrique | Hauteur de l'anémomètre | Changement de matériel | Changement pour le calcul de la vitesse moyenne |
|------------|--------------------------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
| 11-1944 | | 5 mètres | Anémomètre à palette | 2 mesures/jour |
| 01-02-1945 | | | | 3 mesures/jour |
| 01-12-1945 | | 11.5 mètres | Anémomètre Papillon | |
| 01-04-1950 | | 12 mètres | | |
| 01-01-1958 | | | | 8 mesures/jour |
| 01-07-1963 | oui | 11 mètres | | |
| 09-1969 | | 10.5 mètres | | |
| 09-10-1975 | | | Anémomètre de type P | |
| 01-04-1994 | | | Anémomètre à lecture optique | |
| 01-08-1994 | oui | | | |

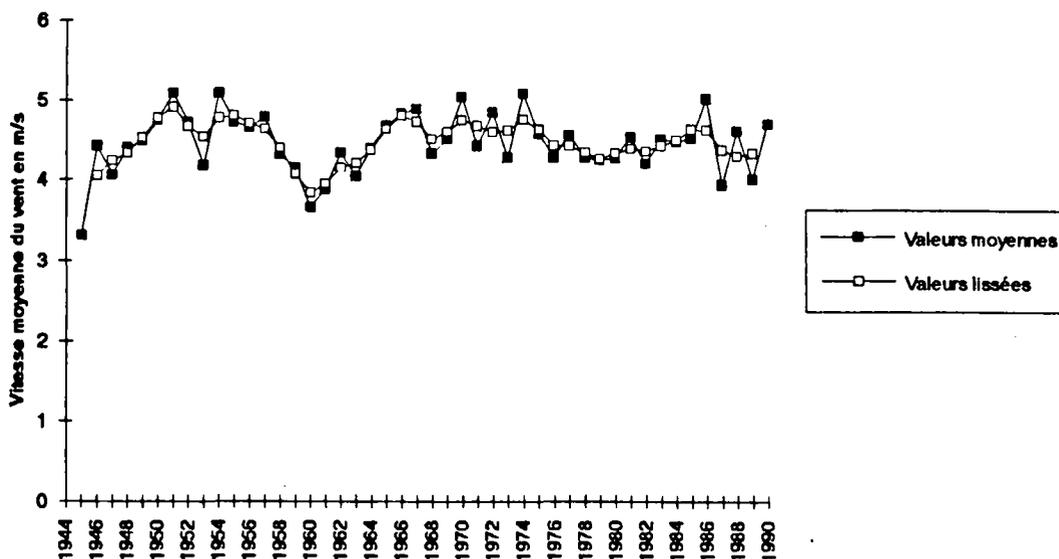
Tableau 14 : Paramètres influençant les mesures de la vitesse du vent à Lesquin depuis l'ouverture de la station météorologique.

Comme on peut le voir, la hauteur à laquelle sont faites les mesures a changé 4 fois sur la période. L'emplacement du pylône anémométrique a été déplacé en

1963 et de nouveau en 1994. On a aussi changé deux fois le mode de calcul des vitesses moyennes : les 2 premiers mois de l'existence de la station, celle-ci était faite à partir de 2 relevés quotidiens, puis jusqu'en 1958, celle-ci a été faite à partir de 3 relevés quotidiens. A partir de cette date, 8 relevés sont utilisés. Le matériel a aussi été changé plusieurs fois en 40 ans. Il faut noter que les valeurs sont enregistrées sur des diagrammes en papier depuis le 8 Mai 1948. Toutes les valeurs horaires moyennées sur 10 minutes sont archivées sur les carnets d'observations de la station météorologique de Lesquin. Tous ces changements dans la façon de faire ont une influence sur la qualité des valeurs moyennes.

Il est possible de corriger les valeurs afin d'obtenir une vitesse moyenne annuelle à 10 mètres au-dessus du sol en utilisant la loi exponentielle, voir l'équation à la page 49. Pour la période antérieure à Décembre 1945, on utilisera un coefficient correcteur de 1.10, de 1945 à 1950, un coefficient de 0.98, de 1950 à 1963, un coefficient correcteur de 0.97 et de 1963 à 1969, un coefficient correcteur de 0.99.

Le graphique ci-dessous montre la variation de la vitesse moyenne du vent à Lesquin sur la période 1945-1990.

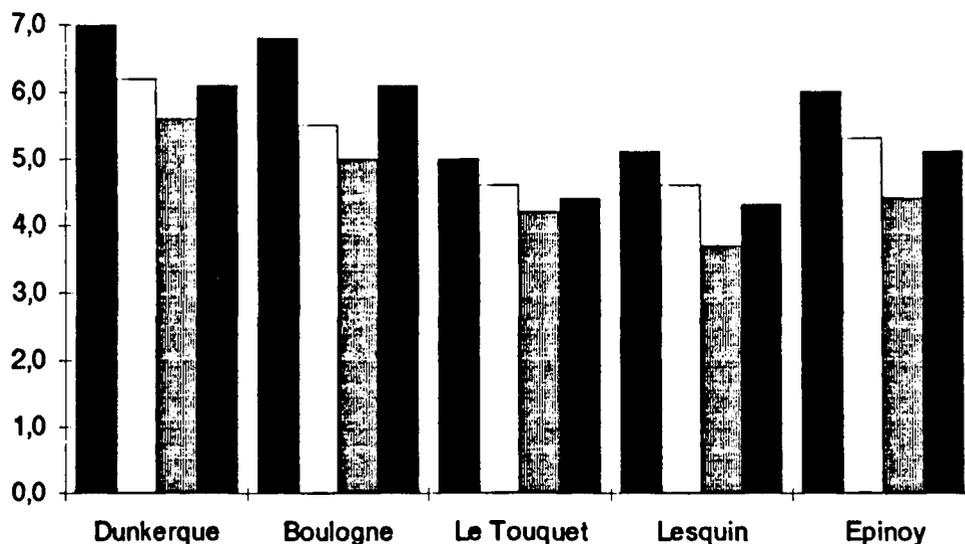


Graphique 5 : Variations de la vitesse moyenne annuelle à Lesquin à 10 mètres au-dessus du sol, en m/s.

Sur la période de 46 ans, on observe des fluctuations, mais de moins grandes ampleurs qu'à Southport : à Lesquin, les valeurs sont comprises entre 3.7 et 5.1 m/s. On observe une alternance de périodes avec une vitesse moyenne annuelle élevée (1950-1957, 1965-1975, 1983-1986) et de périodes avec une vitesse moyenne plus faible (1958-1964, 1976-1982). Cette variabilité de la vitesse du vent peut entraîner de grandes fluctuations dans la production d'énergie éolienne.

LES VARIATIONS SAISONNIERES DE LA VITESSE DU VENT

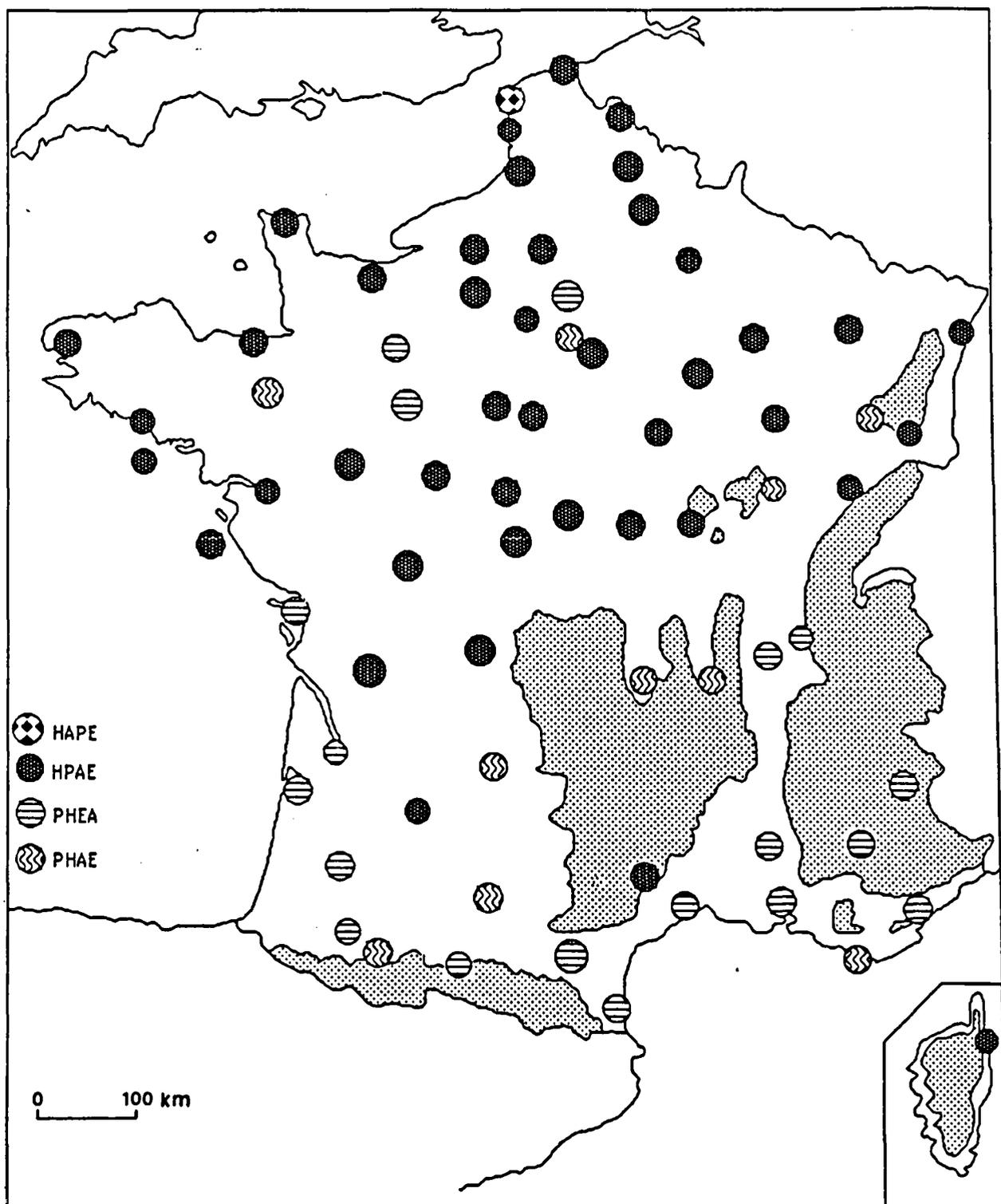
En valeur moyenne, l'hiver (H) est la saison la plus venteuse, suivie par le printemps (P) et l'automne (A); l'été (E) est la saison la plus calme; ce que nous avons convenu d'appeler en abrégé, le régime "HPAE", sauf pour Boulogne où l'ordre du printemps et de l'automne est inversé, régime "HAPE".



Graphique 6 : Vitesse moyenne saisonnière, en m/s.

La première colonne représente l'hiver, la seconde le printemps, la troisième l'été et la dernière l'automne.

Le régime HP AE est une caractéristique de la moitié nord de la France, comme le montre la carte de France située ci-après. Cette carte a été réalisée à partir des données du Résumé Mensuel du Temps (RMT) sur la période 1979-1988. Ailleurs, la saison la plus venteuse est le printemps, ce qui donne des régimes dominants PHEA et PHAE.



Carte 5 : Régimes saisonniers du vent dans les stations françaises, 1979-1988.

Si on étudie les fréquences d'apparition de ces régimes moyens (voir le tableau situé en annexe à la page 147), on remarque que le *régime HPAE* apparaît 6 fois sur les 12 années à Dunkerque, 4 fois à Lesquin, 3 fois à Epinoy et seulement 2 fois au Touquet, tandis que le *régime moyen HAPE* apparaît 6 fois sur 12 à Boulogne.

A Epinoy, le régime moyen n'est pas celui qui est le mieux représenté; ainsi, le *régime HAPE* est apparu 6 fois, tandis que le régime *HPAE* n'est apparu que 3 fois.

Excepté Boulogne et Dunkerque où la fréquence d'apparition du régime moyen est égal à 0.5, on peut dire que celui-ci ne se retrouve pas dans la réalité, et qu'il est plutôt la moyenne de plusieurs régimes. On en trouve jusqu'à 8 différents au Touquet, 6 à Lesquin et Boulogne, 5 à Dunkerque, et 3 seulement à Epinoy, qui est à ce point de vue-là, la station la plus stable.

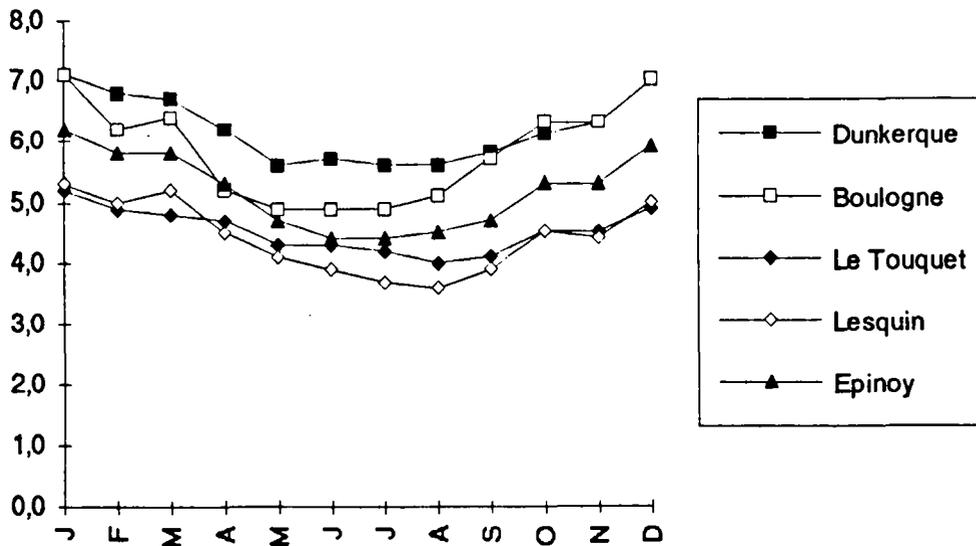
Certaines années, on retrouve le même régime pour quasiment toutes les stations de la région Nord-Pas-de-Calais. Ainsi en 1983 et 1984, le régime saisonnier a été *HAPE* et en 1990 *HPAE* (voir le tableau situé en annexe à la page 147).

Si on intègre les informations des stations automatiques, on remarque qu'en 1989, sur 10 stations, le régime *HPAE* est apparu 8 fois, le régime *HAPE* est apparu à Boulogne et le régime *PHAE* au Touquet, voir le tableau situé en annexe à la page 147.

En 1990, le régime *HPAE* concerne pratiquement toutes les stations de la région Nord-Pas-de-Calais; il est apparu dans 13 stations sur 14. Les mois exceptionnellement venteux de Janvier et Février 1990 ont fait de l'hiver la saison la plus venteuse. Les mois de Mars et Avril ont été plus venteux que ceux d'Octobre et Novembre et assurent au printemps la deuxième place, tandis que l'été 1990 a été conforme à la moyenne et se trouve en dernière position. Dans les régions limitrophes, le régime *HPAE* est apparu dans les 6 stations belges, dans 5 des 8 stations de la Somme, voir la carte située en annexe à la page 148.

En fait, les valeurs moyennes saisonnières de la vitesse du vent, cachent une grande variabilité qui se retrouve d'ailleurs dans d'autres phénomènes météorologiques comme les précipitations.

Les mois où la vitesse moyenne est supérieure à la vitesse moyenne annuelle sont les suivants : Janvier, Mars, Novembre et Décembre pour les 5 stations synoptiques, Février pour toutes les stations sauf pour celle de Boulogne, Octobre pour Boulogne, Lesquin et Epinoy, Avril pour Le Touquet et Lesquin et Septembre pour Boulogne.



Graphique 7 : Variations mensuelles de la vitesse du vent, en m/s, 1979-1990.

Les mois les plus venteux sont ceux d'hiver, d'automne et du début du printemps, et les mois les plus calmes sont ceux de l'été, Juillet et Août.

Dans la région Nord-Pas-de-Calais, la vitesse moyenne du vent est bien corrélée aux consommations d'électricité qui sont beaucoup plus importantes en saison froide qu'en été.

Pour les producteurs d'électricité éolienne, Electricité de France, EDF, propose un tarif à deux postes : été, hiver. Le poste hiver commence le 1er Novembre et s'achève le 31 Mars. Le tarif d'achat d'hiver est beaucoup plus avantageux que celui de l'été : 0.40 F le kWh, et même 0.53 F le kWh si la prime de qualité est accordée, contre 0.15 F le kWh en été. Si on calcule la vitesse moyenne du vent pour les 2 postes définis par EDF, on obtient les valeurs résumées dans le tableau suivant :

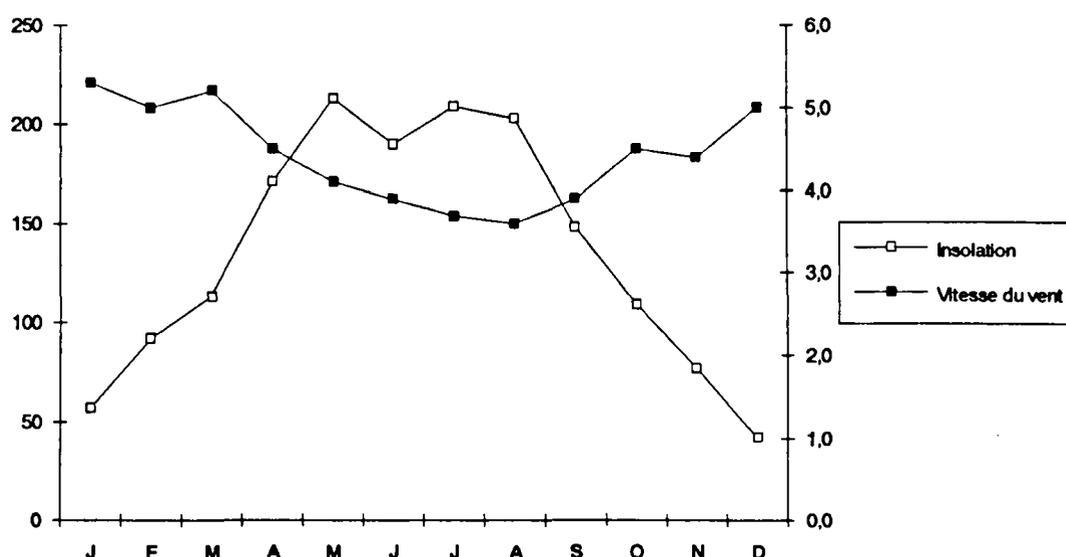
| | Dunkerque | Boulogne | Le Touquet | Lesquin | Epinoy |
|----------------|-----------|----------|------------|---------|---------|
| Eté (7 mois) | 5.8 m/s | 5.3 m/s | 4.3 m/s | 4.0 m/s | 4.8 m/s |
| Hiver (5 mois) | 6.8 m/s | 6.6 m/s | 4.9 m/s | 5.0 m/s | 5.8 m/s |
| Année | 6.2 m/s | 5.8 m/s | 4.5 m/s | 4.4 m/s | 5.2 m/s |

Tableau 15 : Vitesse moyenne du vent en fonction du tarif 2 postes d'EDF.

Le régime des vents semble donc intéressant dans le cas d'une tarification EDF à 2 postes, été-hiver, pour le rachat du courant produit par des éoliennes.

La mauvaise réputation du climat du Nord de la France provient aussi du déficit d'insolation qui se remarque surtout en été. La durée mensuelle d'insolation en été est d'environ 200 heures à Lesquin contre 300 et plus dans le Sud de la France.

L'énergie éolienne semble complémentaire de l'énergie solaire qui est plus importante à la fin du printemps et en été, comme le montre le graphique ci-dessous :



Graphique 8 : Complémentarité de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne à Lesquin, 1979-1990 : l'insolation est exprimée en heures de soleil (échelle de gauche) et la vitesse du vent en m/s (échelle de droite).

L'utilisation conjointe d'électricité éolienne et solaire est actuellement développée dans plusieurs projets en l'Allemagne.

Dans l'île de Pellworm (Schleswig-Holstein), une centrale hybride photovoltaïque/éolienne fonctionne depuis quelques années (*Schleswig AG.*, 1994). Elle comporte 1 centrale photovoltaïque de 300 kW, 3 éoliennes de 33 kW et 1 éolienne de 300 kW; soit une puissance installée totale de 700 kW. Durant l'année 1993, la centrale hybride a produit 1267 MWh (1 MWh = 1000 kWh), voir le tableau ci-après.

| | Puissance installée | Production d'électricité en 1993 | Nombre d'heures équivalent à pleine puissance |
|----------------------------|---------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| Eolienne de 300 kW | 300 kW | 923 MWh | 3077 |
| 3 éoliennes de 33 kW | 100 kW | 183 MWh | 1825 |
| Centrale solaire de 300 kW | 300 kW | 161 MWh | 538 |
| Total | 700 kW | 1267 MWh | 1810 |

Tableau 16 : Production de la centrale hybride de Pellworm en 1993.

Ce sont les éoliennes qui produisent le plus d'électricité : entre 1800 et 3100 kWh par kW, contre 500 pour la centrale photovoltaïque. L'énergie photovoltaïque est surtout abondante en été, voir le graphique situé en annexe à la page 149. Cependant, elle n'est pas nulle en hiver comme le montre le graphique du 16 Février 1994 situé en annexe à la page 149.

LE REGIME MENSUEL

L'ordre décroissant des valeurs moyennes mensuelles de la vitesse du vent des 5 stations est le suivant : Janvier, Décembre, Mars, Février, Novembre, Octobre, Avril, Septembre, Mai, Juin, Août et Juillet, voir le tableau situé en annexe à la page 150.

Ce sont les régimes moyens d'Epinoxy et de Dunkerque qui sont les plus proches du régime moyen régional, avec un coefficient de Spearman de 0.98 et 0.97. Cependant, ceux des 3 autres stations ne sont pas très éloignés : les coefficients de corrélation sont égaux à 0.94 à Lesquin et Boulogne et à 0.91 au Touquet.

Les régimes mensuels sont donc relativement identiques dans les 5 stations synoptiques de la région.

Le mois le plus venteux, en moyenne, est celui de Janvier.

Puis, en deuxième position, nous trouvons le mois de Décembre : il occupe le deuxième rang à Dunkerque, Boulogne, Le Touquet, Epinoxy et le quatrième à Lesquin.

Le mois de Mars arrive en troisième position avec deux places de troisième, Boulogne et Epinoxy, une place de deuxième pour Lesquin et deux places de quatrième pour Dunkerque et Le Touquet.

Viennent ensuite les mois de :

Février avec une seule place de quatrième; la quatrième position de ce mois résulte de la moyenne de rangs différents,
Novembre avec 2 places de cinquième,

La position des mois de :

Octobre avec deux places de sixième ex aequo,
Avril avec aucune place de septième,
Septembre avec une seule place de huitième,
Mai sans une seule place de neuvième, résultent de la moyenne de rangs différents.

Par rapport aux résultats de l'atlas éolien régional (*F. Paul, G. Petit-Renaud, 1991*) fait à partir des données de la période 1979-1988, le mois de Février est passé de la 5^{ème} à la 4^{ème} place grâce à la forte valeur du mois de Février 1990, 10.6 m/s à Boulogne et 7.6 m/s à Lesquin, voir le tableau situé en annexe à la page 150. Comme la période d'étude est courte, 12 ans, un mois exceptionnel peut changer l'ordre du régime mensuel d'une place.

Pour les 3 mois les moins ventés, Juin, Juillet et Août, les différentes stations ont un comportement relativement voisin.

Les divergences entre les stations se produisent surtout dans le milieu du classement, du rang 4 au rang 9, ce qui correspond surtout à l'automne et au printemps. Certains mois d'automne dépassent ceux du printemps dans certaines stations, mais pas dans toutes; c'est ce qui explique les différences de classement. A l'inverse, pour les mois d'hiver et d'été, l'unanimité est presque totale; les stations ont sensiblement le même classement.

En fréquence, le régime moyen n'apparaît jamais, car il y a trop de combinaisons possibles avec les 12 mois de l'année. Par contre, on peut, avec un test de rangs de Spearman, estimer le degré de rapprochement de chaque régime annuel avec le régime moyen de chaque station, voir le tableau situé en annexe à la page 150.

Si les régimes annuels étaient identiques au régime moyen, leurs coefficients de corrélation seraient égaux à 1, ce qui n'est arrivé dans aucune des 5 stations pour les dix années étudiées.

Les régimes annuels les plus voisins du régime moyen sont ceux dont les coefficients de corrélation sont les plus proches de 1, c'est-à-dire par ordre décroissant : 1979, 1990 et 1986, puis viennent des années avec des coefficients de l'ordre de 0.70 : 1981 et 1983, puis ceux-ci sont encore plus faibles les autres années : 1980, 1982, 1984, 1988, 1989. Viennent ensuite 2 années avec un coefficient voisin de 0.40 : 1985 et 1987.

La valeur mensuelle la plus élevée est de 10.6 m/s à Boulogne, de 9.0 m/s à Epinoy, de 8.9 m/s à Dunkerque, de 7.6 m/s à Lesquin et de 6.6 m/s au Touquet.

Par contre les valeurs mensuelles les plus faibles sont de 2.9 m/s à Lesquin, de 3.0 m/s au Touquet et à Boulogne, de 3.4 m/s à Epinoy et de 4.4 m/s à Dunkerque.

Si on classe les 144 valeurs mensuelles, on obtient une distribution des valeurs mensuelles de vitesse de vent dissymétriques, voir le tableau et le graphique situés en annexe à la page 151.

ECART-TYPE et COEFFICIENT DE VARIATION

Les écarts-types des valeurs mensuelles de la vitesse du vent n'ont pas une valeur constante au cours de l'année. Ils sont plus élevés en hiver et en automne qu'en été et au printemps, comme le montre le tableau situé en annexe à la page 152.

Si l'on compare maintenant les valeurs mensuelles maximales et minimales de la vitesse du vent, on observe que le rapport entre la valeur maximale et la valeur minimale est compris entre 1.21 en Avril au Touquet et 2.26 en Février à Boulogne.

En annexe, à la page 153, on trouvera toutes les valeurs maximales et minimales mensuelles, le rapport V_{\max}/V_{\min} ainsi que la différence entre la valeur mensuelle maximale et la valeur mensuelle minimale des 5 stations synoptiques.

Si, à l'échelle annuelle, la vitesse du vent varie peu, au niveau mensuel, la variation est plus grande, puisque, pour un même mois, le rapport V_{\max}/V_{\min} peut dépasser 2.

La différence entre la valeur mensuelle maximale et la valeur mensuelle minimale varie selon les saisons. Elle est plus importante en hiver et en automne qu'en été où elle atteint sa valeur minimale, sauf à Boulogne, où celle-ci se situe en mai.

La différence entre la valeur mensuelle maximale et la valeur mensuelle minimale est plus grande à Boulogne que dans les autres stations. Dans les 4 autres stations, celle-ci varie de la même façon tout au long de l'année, sauf au Touquet, au printemps, où cette différence est très faible.

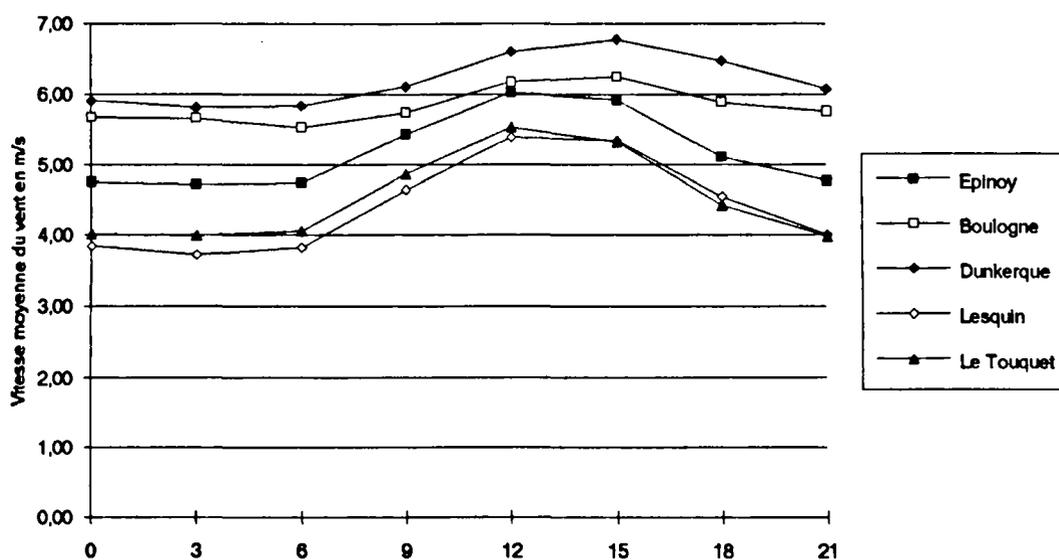
L'étude des écarts-types et des coefficients de variation montre que les variations mensuelles sont fortes à Boulogne. Elles sont beaucoup plus faibles à Dunkerque, Le Touquet et Epinoy, voir le tableau situé en annexe à la page 152.

La variabilité de la vitesse mensuelle du vent est plus importante en hiver et en automne qu'en été. Celle-ci est aussi plus importante que la variabilité annuelle; ce qui veut dire qu'il y a, au cours d'une même année, un ou des phénomènes de compensation entre les mois à vitesse de vent élevée et ceux à vitesse plus faible.

LES VARIATIONS DIURNES DE LA VITESSE DU VENT

Au cours de la journée, la vitesse du vent n'est pas constante. L'allure des courbes formées par la vitesse du vent au cours de la journée est une sinusoïde avec un minimum en fin de nuit et un maximum en milieu de journée.

Nous avons calculé la variation diurne de la vitesse du vent sur la période 1979-1990 pour les 5 stations synoptiques de la région Nord-Pas-de-Calais.



Graphique 9 : Variations diurnes de la vitesse du vent, 1979-1990, en m/s

La vitesse minimale moyenne s'observe à 03 heures à Lesquin, Epinoy et Dunkerque, à 06 heures à Boulogne et à 21 heures au Touquet, tandis que la vitesse maximale se produit à 12 heures à Lesquin, Le Touquet et Epinoy et 15 heures à Dunkerque et Boulogne, comme le montrent le graphique ci-dessus et le tableau situé en annexe à la page 154.

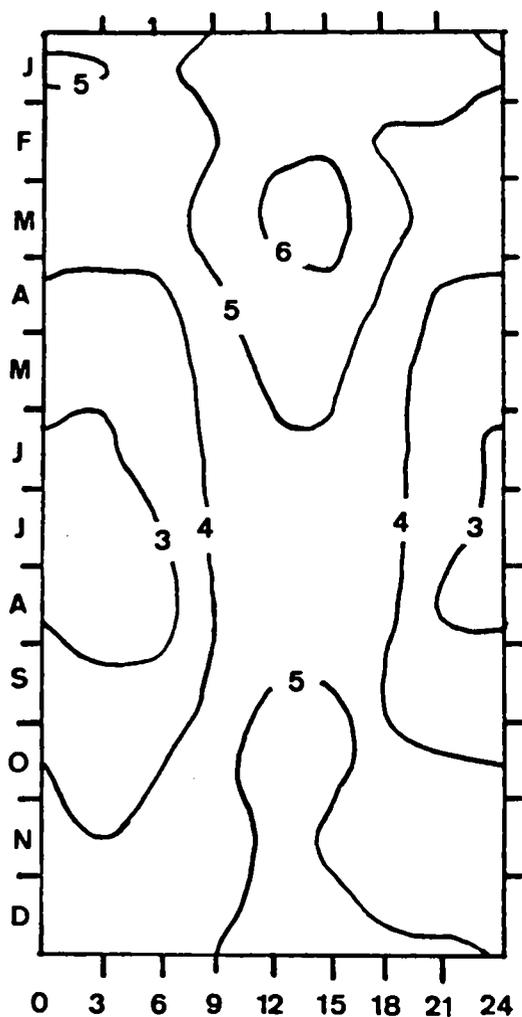
De 21 heures à 6 heures du matin, les vitesses moyennes du vent sont pratiquement les mêmes, de 0.1 à 0.3 m/s près. De même, entre 12 et 15 heures, les vitesses sont pratiquement identiques à 0.1 ou 0.2 m/s.

La différence entre la valeur horaire maximale et la valeur horaire minimale est plus faible pour les deux stations du littoral, Boulogne et Dunkerque, 0.7 à 0.9 m/s que pour les autres stations, 1.3 à 1.7 m/s.

Si on calcule le rapport entre la valeur horaire maximale et la valeur horaire minimale, on remarque que celui-ci est plus faible sur le littoral qu'à l'intérieur des terres : 1.13 à Boulogne et Dunkerque, contre 1.39 au Touquet, 1.45 à Lesquin. Ailleurs en France, le rapport peut atteindre des valeurs plus importantes comme à Nevers, où celui-ci est de 1.82.

Pour la période 1989-1990, on remarque que les conclusions sont identiques pour les stations automatiques : mêmes variations de la vitesse du vent au cours de la journée, même différence entre les valeurs horaires maximales et minimales 0.8 à 0.9 m/s pour les stations du littoral, 1.1 à 1.8 m/s pour les stations de l'intérieur.

SAISONNALITE DES VARIATIONS DIURNES DE LA VITESSE DU VENT DANS LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS



Graphique 10 : Vitesse moyenne du vent en m/s à Lesquin, pour la période 1979-1990, en fonction de l'heure et du mois.

Ainsi, bien que les moyennes estivales de la vitesse du vent soient plus faibles que celles des autres saisons, celles-ci ne sont pas négligeables au cours de l'après-midi, où elles atteignent, en moyenne, 4.8 à 4.9 m/s à Lesquin.

Au cours de l'année, la position de la vitesse maximale, comme le montrent les tableaux en annexe pages 155 à 157, varie à Lesquin et Epinoy : de 12 heures en automne, hiver et début de printemps, elle passe à 15 heures à la fin du printemps et en été. Par contre, au Touquet, la position de celle-ci est toujours, en moyenne, à 12 heures, et celle de Dunkerque à 15 heures, dix mois sur douze. A Boulogne, de Février à Septembre, celle-ci se situe à 15 heures, sauf en mai où elle est à 12 heures; pour les autres mois, la position de la vitesse moyenne maximale se situe à 21 et 03 heures.

La position de la vitesse moyenne minimale change aussi à Lesquin et Epinoy au cours de l'année : de 06 heures en automne et en hiver, elle passe à 03 heures au printemps et en été, et même parfois à 00 heure en été.

Pour les autres stations, on n'observe pas de telles variations saisonnières. A Dunkerque, la position de la vitesse moyenne minimale se situe, durant 7 mois de l'année, à 03 heures; pour les autres mois, celle-ci se situe à 00, 06, 09 et 21 heures. A Boulogne, celle-ci se situe plutôt à 06 heures (6 mois sur 12), tandis que pour les autres mois, elle est à 03, 09 et 21 heures. Au Touquet, il n'y a aucune position dominante : 3 mois à 03, 18 et 21 heures, 2 mois à 00 et 06 heures.

De manière générale, la position de la vitesse moyenne minimale est moins bien affirmée que celle de la vitesse moyenne maximale. En effet, de 21 à 06 heures du matin, la vitesse moyenne du vent est presque constante.

Les différences entre les valeurs horaires maximales et minimales sont nettement plus faibles en fin d'automne et en hiver qu'au printemps, en été et en début d'automne, comme le montre le tableau ci-après qui expose la situation de Boulogne :



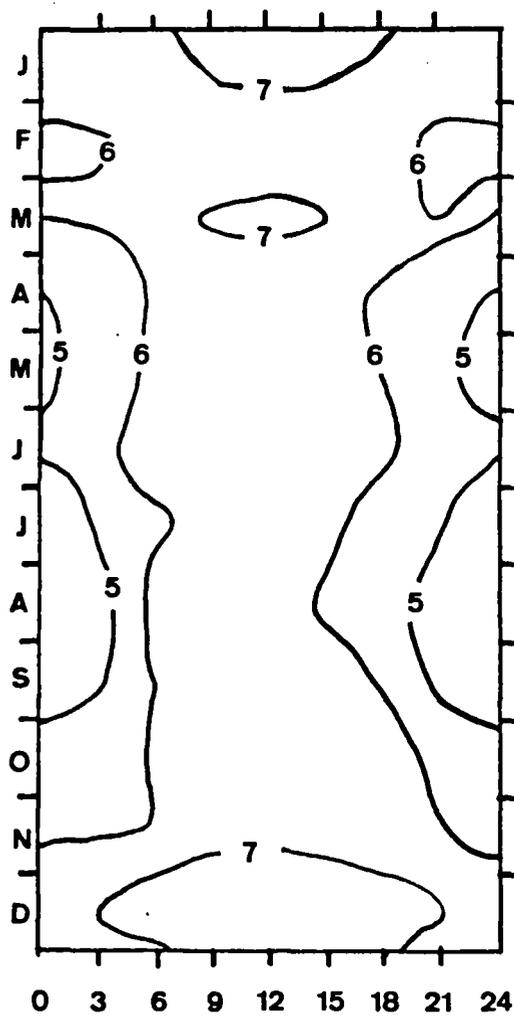
| | 00h | 03h | 06h | 09h | 12h | 15h | 18h | 21h |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Janvier | 7,0 | 7,0 | 6,9 | 7,0 | 7,1 | 7,2 | 7,1 | 7,2 |
| Février | 6,2 | 6,1 | 6,2 | 6,1 | 6,3 | 6,4 | 6,3 | 6,4 |
| Mars | 6,4 | 6,4 | 6,2 | 6,4 | 6,8 | 6,9 | 6,3 | 6,1 |
| Avril | 4,8 | 5,0 | 4,8 | 5,3 | 5,9 | 6,0 | 5,2 | 5,0 |
| Mai | 4,6 | 4,5 | 4,4 | 4,9 | 5,5 | 5,5 | 5,0 | 4,5 |
| Juin | 4,5 | 4,5 | 4,5 | 5,0 | 5,5 | 5,7 | 5,2 | 4,6 |
| Juillet | 4,6 | 4,5 | 4,4 | 4,7 | 5,5 | 5,7 | 5,2 | 4,8 |
| Août | 4,9 | 4,8 | 4,6 | 5,0 | 5,7 | 5,9 | 5,2 | 5,0 |
| Septembre | 5,5 | 5,5 | 5,4 | 5,5 | 6,1 | 6,1 | 5,6 | 5,6 |
| Octobre | 6,3 | 6,4 | 6,2 | 6,1 | 6,4 | 6,4 | 6,2 | 6,5 |
| Novembre | 6,3 | 6,4 | 6,3 | 6,2 | 6,3 | 6,3 | 6,4 | 6,4 |
| Décembre | 7,1 | 7,1 | 6,8 | 6,9 | 7,0 | 7,0 | 7,0 | 7,1 |

Tableau 17 : Variations diurnes de la vitesse du vent à Boulogne, en m/s, 1979-1990.

La variation diurne de la vitesse du vent est liée à celle de la température. Durant la journée, le soleil provoque un mélange thermique; celui-ci génère, à basse altitude, des vents plus forts sur terre que sur mer. Durant la nuit, le mélange thermique est plus faible et le profil vertical de la vitesse du vent est plus stable sur terre (*M. H. Guda, 1994*). La variation diurne est plus marquée à l'intérieur que sur le littoral, car le contraste thermique y est plus fort. Elle est aussi plus forte en été qu'en saison froide.

Le graphique ci-dessous présente la nébulosité à Lesquin et montre bien, à une échelle plus fine, la complémentarité de l'énergie éolienne et de l'énergie solaire. La nébulosité est plus faible en été et durant la nuit, tandis que la vitesse du vent est plus forte en hiver et durant la journée.

L'énergie éolienne correspond bien à la tarification 2 postes (été-hiver) et même 4 postes (été-hiver-jour-nuit) de rachat du courant électrique proposée par EDF. L'énergie éolienne varie en fonction du cube de la vitesse du vent mais aussi en fonction des conditions topographiques. Aussi, les valeurs des vitesses de vent ne sont utilisables sans corrections que dans les environs immédiats des stations météorologiques. Pour estimer la vitesse du vent, le potentiel éolien de n'importe quel point de la région Nord-Pas-de-Calais et réaliser un atlas éolien régional, il faut donc utiliser un logiciel de calcul.



Graphique 11 : Nébulosité à Lesquin en octas, pour la période 1979-1990 en fonction de l'heure et du mois.

**ATLAS EOLIEN
DE LA
REGION NORD-PAS-DE-CALAIS**

CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL EOLIEN

Plusieurs modèles de calcul de la vitesse du vent ou du potentiel éolien existent actuellement.

Le modèle NOABL développé par des chercheurs canadiens est un modèle utilisé pour calculer la vitesse du vent dans les terrains complexes. Il ne tient pas compte de la force de Coriolis et ne prend pas en compte les effets des changements de la rugosité.

Aussi, des chercheurs italiens l'ont modifié. Le programme WINDS, Wind-field Interpolation Non-Divergent Schemes, subdivise la Couche Limite de Surface en plusieurs strates caractérisées par différentes conditions de stabilité atmosphérique. Un profil logarithmique a été introduit afin d'estimer le profil vertical de la vitesse du vent. Les effets de la rugosité sont pris en compte, de même que la force de Coriolis en altitude, et il est possible de travailler à partir des données du vent géostrophique. Des applications ont été faites sur la Sardaigne et la Ligurie (*C.F. Ratto et coll., 1990*).

Une comparaison des 2 modèles, NOABL et WINDS, menée sur la Sicile (*F. Vivona, 1990*) a montré que les résultats ne différaient pas de plus de 10%. Cette étude a aussi montré la difficulté de simuler la vitesse du vent dans des régions où le relief est complexe.

En France, la société ARIA a développé avec EDF le modèle Minerve. C'est un modèle 3D de calcul du vent en terrain complexe. Il conserve la masse et utilise la stabilité atmosphérique en temps réel. Minerve utilise un modèle numérique de terrain pour le relief, des informations sur la vitesse et la direction du vent, des informations sur la stabilité de l'air. Les informations météorologiques peuvent être des données éparées, des données de prévision ou des valeurs arbitraires. Minerve calcule un champ de vitesse de vent sur un maillage tridimensionnel. Avec ce modèle il est possible de reconstituer un champ de vent à n'importe quel endroit et à n'importe quel instant de la journée.

Le programme WAsP, Wind Atlas, Analysis and Application Programme, a été développé par le laboratoire de Risoe au Danemark en collaboration avec une dizaine d'autres laboratoires et centres de recherche européens dont le CSTB de Nantes. Il utilise des données statistiques de vent, des données topographiques, courbes de niveau et limites d'agglomération, de forêt, de surfaces aquatiques. Il est bien adapté pour les régions qui ne présentent pas un relief complexe, comme le Nord-Pas-de-Calais. Il est largement utilisé en Europe et est devenu la norme dans le domaine du calcul du potentiel éolien. Il est commercialisé et une équipe de techniciens en assure le suivi et propose régulièrement de nouvelles versions. Dans le Nord-Pas-de-Calais, il a été utilisé pour réaliser l'atlas éolien en 1991 (*F. Paul, G. Petit-Renaud, 1991*). Pour toutes ces raisons ainsi que pour des raisons

budgétaires (Minerve est par exemple commercialisé aux environs de 50 000 Francs), nous avons utilisé le WAsP pour estimer la vitesse moyenne du vent et le potentiel éolien de la région Nord-Pas-de-Calais.

DESCRIPTION DU MODELE WAsP

Le modèle WAsP, Wind Atlas Analysis and Application Programme, a été spécialement développé pour réaliser l'Atlas Eolien Européen. Celui-ci, commencé en 1981 pour la Commission Européenne, a été terminé en 1988. Il avait pour but d'identifier les régions dotées d'un potentiel permettant l'exploitation de l'énergie éolienne à grande échelle. La première version du logiciel WAsP a été disponible en 1987. Au début de l'année 1993, la 4^{ème} version, beaucoup plus puissante, permet notamment de visualiser en 2 et 3 dimensions les secteurs sur lesquels des calculs sont effectués.

Dans le modèle WAsP, il est possible d'estimer la vitesse moyenne du vent et le potentiel éolien ainsi que de simuler la production de n'importe quelle éolienne d'un site situé à X mètres au-dessus du sol, dans un environnement précis à partir des données d'une autre station ayant des caractéristiques de vent et de rugosité différentes. Pour cela, il faut décrire correctement le relief et la rugosité, c'est à dire connaître les limites exactes des agglomérations, des forêts, des surfaces en eau de la station de référence et du site où l'on veut connaître la vitesse moyenne du vent. Le vent peut être aussi fortement perturbé par la présence d'obstacles proches tels qu'un bâtiment ou une rangée d'arbres. Aussi, le pylône anémométrique doit être situé à une distance d'au moins 10 fois la hauteur des obstacles environnants. Le degré d'applicabilité des données de vent d'une station aux régions environnantes est plus important quand le relief et la rugosité sont homogènes.

Le modèle WAsP est basé sur les lois de frottement géostrophique, la théorie de similitude de la couche limite de surface, ce qui n'avait jamais été appliqué auparavant sur de vastes régions (*I. Troen, E. Petersen, 1991*), et aussi sur les modifications de l'écoulement dues au changement des caractéristiques de la surface, voir les annexes situées dans les pages 158 à 161, l'écoulement au-dessus des terrains accidentés, voir pages 18 et 19 ainsi que les annexes aux pages 9 et 10.

Dans l'Europe du Nord-Ouest dont fait partie le Nord de la France, le régime des vents consiste principalement en dépressions et anticyclones migrants se déplaçant vers l'Est et le Nord-Est. Le vent géostrophique moyen de cette partie de l'Europe est bien défini sur de vastes régions (voir la carte située en annexe à la page 7). Il montre un gradient du Nord-Ouest au Sud-Est.

Dans le modèle WAsP, la valeur de U^* , la vitesse de friction, est calculée à partir de la valeur du vent géostrophique :

$$U^* = G \times 0.485 / (\ln G / f - A) ;$$

$$G = U^* / k ((\ln (U^* / f z_0) - A)^2 + B^2)^{1/2}$$

avec

U* la vitesse de friction,
 G la vitesse du vent géostrophique,
 f le paramètre de Coriolis ($2\sin\theta$, θ est la latitude),
 z₀ la longueur de rugosité,
 k la constante de von Karman,
 A et B des paramètres égaux à 1.8 et 4.5.

Les données de vitesses du vent sont généralement bien ajustées par la distribution de Weibull. Cette distribution est caractérisée par deux paramètres : le paramètre d'échelle, a, exprimé en m/s, qui est en rapport avec la vitesse moyenne du vent au travers de la fonction gamma, et le paramètre de forme, k, sans dimension, qui décrit la dispersion des données, c'est-à-dire la forme de la courbe (voir le graphique situé en annexe à la page 162) :

$$f(u) = k/A (u/A)^{k-1} \exp(- (u/A)^k)$$

avec f(u) = fréquence d'apparition de la vitesse du vent (u).

La densité de puissance moyenne du vent, E, est égale au flux moyen d'énergie cinétique par unité de surface perpendiculaire à l'écoulement.

La production d'énergie éolienne peut-être exprimée à l'aide des paramètres A et k de la loi de Weibull :

$$E = A^3 F_E(k)$$

E est exprimée en kWh/m²/an. Les valeurs de la fonction F_{E(k)} sont indiquées en annexe à la page 163.

Ainsi, à Schipol, voir les annexes aux pages 162 et 163, la valeur de E est égale à 1389 kWh/m²/an, soit une valeur de 159 W/m².

La production moyenne de puissance dépend de la courbe de puissance de l'éolienne (voir l'annexe située en page 164).

Quand la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage, l'éolienne ne produit pas d'électricité. Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse de démarrage, la puissance électrique augmente et atteint un maximum appelé puissance nominale. A partir de la vitesse nominale, la puissance demeure

constante. A une certaine vitesse, appelée vitesse de coupure, on arrête l'éolienne pour éviter des problèmes de casse.

Pour un certain nombre d'éoliennes, la courbe de puissance peut-être décrite par une forme simple (voir le graphique situé en annexe à la page 164) :

$$P = P_{max}/(\alpha_2 - \alpha_1) (G_k(\alpha_2) - G_k(\alpha_1))$$

avec $\alpha_1 = u_1/A$, $\alpha_2 = u_2/A$,

u_1 , la vitesse de démarrage,

u_2 la vitesse nominale,

$G_k(\alpha)$ est lu dans le tableau situé en annexe aux pages 165 et 166,

P est exprimé en kW.

La courbe de puissance se rapporte à une valeur standard de la densité de l'air, 1.225 kg/m^3 , qui correspond à la pression atmosphérique au niveau de la mer et à une température de 15°C . Si la densité de l'air est différente de la valeur standard, la courbe de puissance sera alors proportionnelle au rapport formé par la densité de l'air du site et la valeur standard.

L'utilisation des vitesses de vent moyennées sur dix minutes conduit à une sous-estimation de la densité de puissance parce que la contribution des fluctuations du vent sur des échelles de temps inférieures à dix minutes n'est pas prise en compte. Pour une rugosité de surface homogène et un régime de stabilité neutre, l'intensité de la turbulence, i , peut être estimée par la formule :

$$i = 1 / \ln(z/z_0)$$

Cette sous-estimation est liée à l'intensité de la turbulence et peut-être estimée par une formule de correction égale à :

$$3/(\ln(z/z_0))^2$$

Cette correction n'est valable que pour des conditions de vent fort au-dessus d'un terrain plat et homogène. Les intensités de turbulence peuvent être très différentes sur des sites côtiers ou en terrain accidenté.

Dans le cas de dimensionnement d'éolienne, la contribution de la turbulence à la densité de puissance ne doit pas être ajoutée. En effet, l'éolienne répond avec une certaine inertie aux variations de direction et de vitesse du vent. Dans les estimations de production d'électricité à partir d'une éolienne, les courbes de puissance fournies par les constructeurs se rapportent à des vitesses de vent moyennées sur dix minutes.

Le schéma suivant résume le modèle d'analyse du programme WAsP.

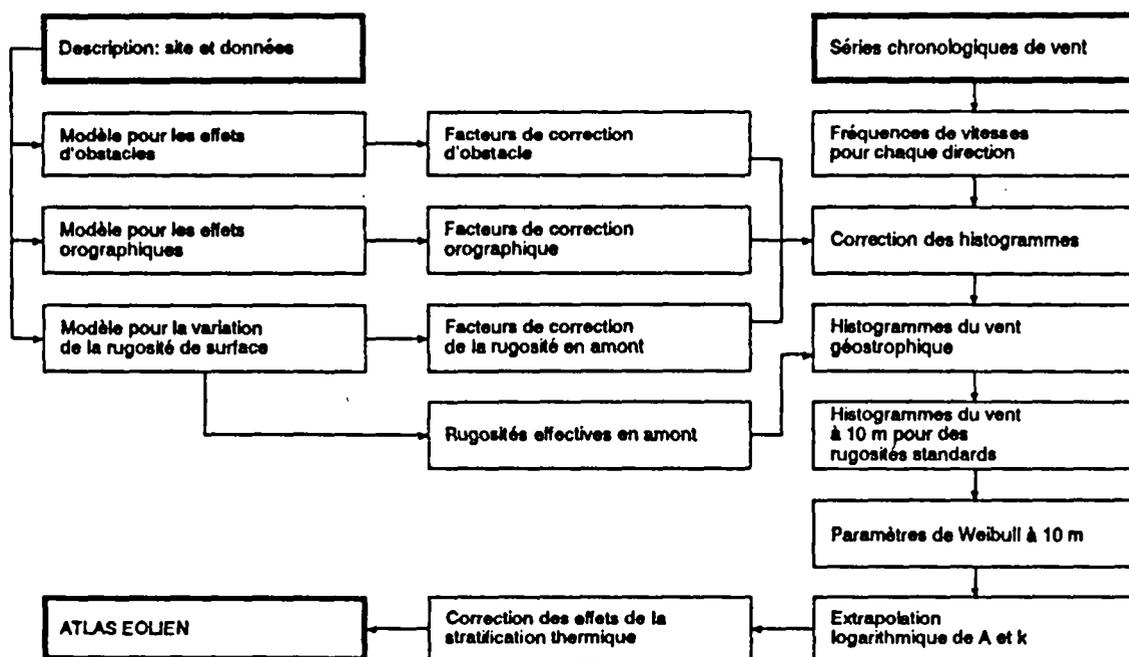


Figure 1 : Modèle d'analyse du programme WAsP.

Pour une station météorologique, les données de vent sont présentées sous forme d'histogrammes pour chacun des 12 secteurs de direction, donnant les fréquences d'occurrence des vitesses de vent pour toutes les classes de 1 m/s.

Différents programmes de saisie et de traitement des données de vent ont été réalisés par M. Petit-Renaud. Ceux-ci permettent de faire des fichiers de fréquence de vitesse pour toutes les directions au format utilisé par le modèle WAsP.

On calcule ensuite les facteurs de correction d'obstacle, de changement de rugosité et d'orographie.

Chaque combinaison de classe de vitesse et de secteur de direction est transformée en utilisant ces facteurs.

L'application des facteurs de correction (obstacle, rugosité, orographie) donne des valeurs correspondant à un terrain plat de rase campagne où les obstacles auraient été retirés.

On utilise la loi de frottement géostrophique; les valeurs de U^* pour la rugosité standard sont obtenues à partir de G . A partir du profil logarithmique, on obtient les valeurs correspondantes des vitesses de vent à 10 mètres. On calcule les contributions de chaque intervalle d'azimut (30°) et de vitesse (1 m/s). On obtient

4 jeux d'histogrammes se rapportant à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol et pour 4 classes de rugosité :

- 0 = mer,
- 1 = régions dégagées,
- 2 = régions avec quelques obstacles,
- 3 = régions avec forêts et agglomérations.

Pour chaque secteur, la fréquence d'occurrence est déduite et les paramètres de Weibull sont ajustés. Le calcul du potentiel éolien à différentes hauteurs tient compte des effets de la variation du flux de chaleur de surface. Les valeurs suivantes sont adoptées pour toutes les stations considérées :

| | |
|------------------------------------------------------|----------------------|
| Flux de chaleur moyen au-dessus du continent | -40 W/m ² |
| Flux de chaleur moyen au-dessus de la mer | 15 W/m ² |
| Moyenne quadratique du flux de chaleur sur continent | 100 W/m ² |
| Moyenne quadratique du flux de chaleur sur mer | 30 W/m ² |

Les données ainsi calculées sont stockées dans un fichier et peuvent être utilisées dans un rayon d'une centaine de kilomètres pour estimer le potentiel éolien de n'importe quel site.

Le schéma ci-dessous montre le fonctionnement du modèle d'application de l'atlas éolien.

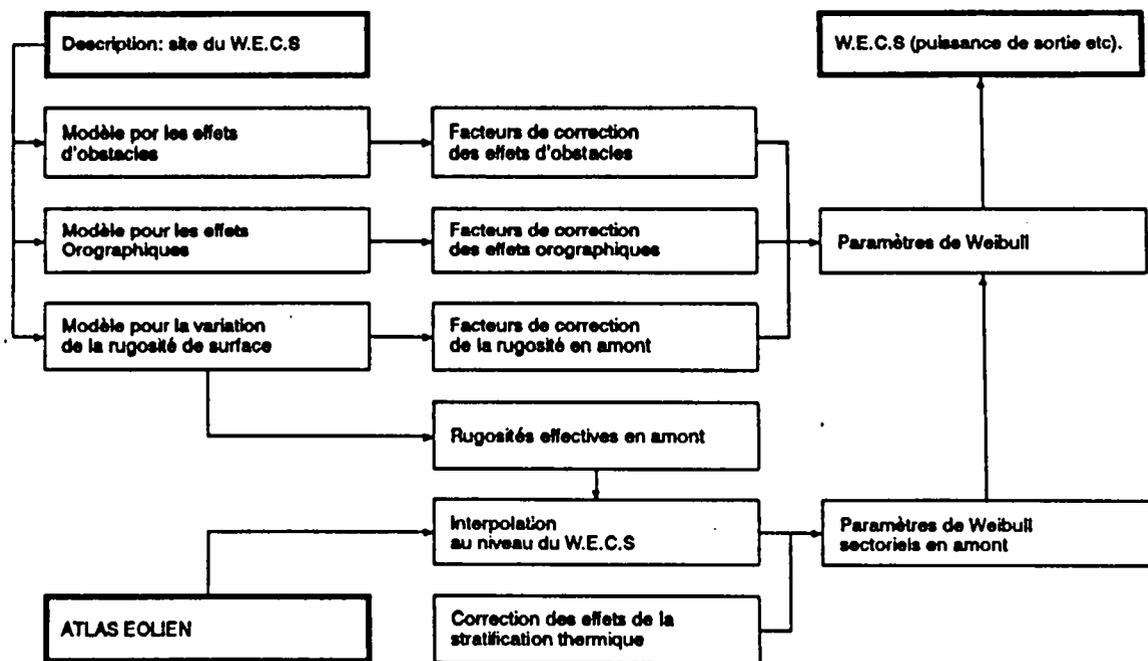


Figure 2 : Modèle d'application du programme WASP.
 WECS = Wind Energy Converter System, c'est-à-dire une éolienne.

Le modèle WAsP a des limites. Son bon fonctionnement dépend de la qualité des données météorologiques, d'une description précise du relief et de la rugosité.

La loi de frottement géostrophique, selon les concepteurs du logiciel (*I. Troen, E. Petersen, 1991*), induit une incertitude de plus ou moins 15% sur le calcul de la vitesse moyenne du vent. L'estimation de la rugosité peut entraîner des erreurs de 5 à 15% pour les vitesses moyennes du vent. Les erreurs les plus grandes se rapportent au calcul de l'écoulement en terrain complexe. L'erreur typique induite par le modèle est de l'ordre de 10% pour les collines de faibles dimensions. Dans les calculs effectués par le logiciel, la fréquence d'occurrence dans chaque classe est conservée. Plus l'anémomètre est influencé par des obstacles proches, plus il sera difficile d'extraire de ces données une information représentative à l'échelle régionale.

Concrètement, le logiciel comporte 74 paramètres qu'il est possible de modifier si l'on dispose d'informations permettant de le faire, voir la liste de ces paramètres en annexe aux pages 167 à 170.

Il est notamment possible de changer les paramètres A et B (paramètres P₁₀ et P₁₁) utilisés pour calculer la vitesse de friction, U*, et la valeur du vent géostrophique, G, si l'on dispose d'informations permettant de le faire. Ainsi, pour l'atlas éolien de la Martinique et de la Guadeloupe (*D. Delaunay, 1986*), le CSTB a utilisé différentes valeurs de A et B en fonction de l'éloignement au littoral et en fonction du moment de la journée. A moins de 2 kilomètres du littoral, les coefficients A et B gardent, dans ce cas, une valeur constante correspondant à la neutralité : A = 1.8, B = 4.5. A plus de 2 kilomètres de la mer, les valeurs de A et de B varient en fonction de l'heure.

Pour l'estimation de la vitesse moyenne du vent sur la colline de Pyhäntunturi (Laponie) à partir des données de la station de Sodankylä (3.1 m/s en valeur annuelle) située à 50 kilomètres, les paramètres P₆, P₇ et P₂₈ du logiciel WAsP (voir annexe pages 167 à 170) ont été modifiés pour tenir compte des informations disponibles sur les inversions thermiques, hauteur et fréquence (*E. Petersen, B. Tammelin, 1992*). En effet, 2 sondages quotidiens sont effectués à la station de Sodankylä. S'il n'avait pas été tenu compte de la grande fréquence d'inversion thermique (50% dans ce cas), on aurait sous-estimé la vitesse moyenne sur la colline de Pyhäntunturi. Une campagne de mesures effectuées sur le site a permis de voir que l'estimation fournie par le WAsP en tenant compte des inversions thermiques était juste, voir le tableau ci-dessous.

Le modèle WAsP a des limites. Son bon fonctionnement dépend de la qualité des données météorologiques, d'une description précise du relief et de la rugosité.

La loi de frottement géostrophique, selon les concepteurs du logiciel (*I. Troen, E. Petersen, 1991*), induit une incertitude de plus ou moins 15% sur le calcul de la vitesse moyenne du vent. L'estimation de la rugosité peut entraîner des erreurs de 5 à 15% pour les vitesses moyennes du vent. Les erreurs les plus grandes se rapportent au calcul de l'écoulement en terrain complexe. L'erreur typique induite par le modèle est de l'ordre de 10% pour les collines de faibles dimensions. Dans les calculs effectués par le logiciel, la fréquence d'occurrence dans chaque classe est conservée. Plus l'anémomètre est influencé par des obstacles proches, plus il sera difficile d'extraire de ces données une information représentative à l'échelle régionale.

Concrètement, le logiciel comporte 74 paramètres qu'il est possible de modifier si l'on dispose d'informations permettant de le faire, voir la liste de ces paramètres en annexe aux pages 167 à 170.

Il est notamment possible de changer les paramètres A et B (paramètres P₁₀ et P₁₁) utilisés pour calculer la vitesse de friction, U*, et la valeur du vent géostrophique, G, si l'on dispose d'informations permettant de le faire. Ainsi, pour l'atlas éolien de la Martinique et de la Guadeloupe (*D. Delaunay, 1986*), le CSTB a utilisé différentes valeurs de A et B en fonction de l'éloignement au littoral et en fonction du moment de la journée. A moins de 2 kilomètres du littoral, les coefficients A et B gardent, dans ce cas, une valeur constante correspondant à la neutralité : A = 1.8, B = 4.5. A plus de 2 kilomètres de la mer, les valeurs de A et de B varient en fonction de l'heure.

Pour l'estimation de la vitesse moyenne du vent sur la colline de Pyhätunturi (Laponie) à partir des données de la station de Sodankylä (3.1 m/s en valeur annuelle) située à 50 kilomètres, les paramètres P₆, P₇ et P₂₈ du logiciel WAsP (voir annexe pages 167 à 170) ont été modifiés pour tenir compte des informations disponibles sur les inversions thermiques, hauteur et fréquence (*E. Petersen, B. Tammelinn, 1992*). En effet, 2 sondages quotidiens sont effectués à la station de Sodankylä. S'il n'avait pas été tenu compte de la grande fréquence d'inversion thermique (50% dans ce cas), on aurait sous-estimé la vitesse moyenne sur la colline de Pyhätunturi. Une campagne de mesures effectuées sur le site a permis de voir que l'estimation fournie par le WAsP en tenant compte des inversions thermiques était juste, voir le tableau ci-dessous.

| | Sodankylä | Pyhätunturi |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|-------------|
| Vitesse moyenne du vent mesurée | 2.9 m/s | 8.1 m/s |
| Vitesse moyenne du vent calculée avec le WASP sans tenir compte des inversions (à partir des données de Sodankylä) | 3.1 m/s | 7.4 m/s |
| Vitesse moyenne du vent calculée avec le WASP en tenant compte des inversions (à partir des données de Sodankylä) | - | 8.0 m/s |

Tableau 18 : Estimation de la vitesse moyenne du vent à la colline de Pyhätunturi, données de 1990-1991.

S'appuyant sur les résultats précédents, des chercheurs espagnols (*R. Zubiaur, F. Martin, 1993*) ont montré pour la Galice une grande sensibilité des résultats pour les paramètres P₆ et P₇ du logiciel WASP.

Dans le Nord-Pas-de-Calais aucun sondage quotidien n'est effectué. Les stations les plus proches où l'on effectue des sondages sont Uccle (Belgique), Trappes (Ile-de-France) et Londres. Aucun correctif n'a donc été apporté sur ces 3 paramètres pour la réalisation de l'atlas éolien de la région Nord-Pas-de-Calais.

CARTOGRAPHIE DU POTENTIEL EOLIEN DE LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS A PARTIR DU PROGRAMME WAsP

L'ATLAS EOLIEN DE LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS DE 1991

La délégation Nord-Pas-de-Calais de l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie et le Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais ont financé, entre 1987 et 1991, la réalisation d'un atlas éolien régional. Celui-ci a été fait avec le logiciel WAsP par le Laboratoire de Climatologie et d'Hydrologie de l'Université des Sciences et Techniques (*F. Paul, G. Petit-Renaud, 1991*).

Pour calculer la vitesse du vent et le potentiel éolien de quelque site que ce soit, à partir des données d'une station météorologique, il a été fourni au modèle WAsP un certain nombre d'informations :

- la hauteur exacte de l'anémomètre,
- un tableau synthétique des données de vent de la station météorologique,
- une carte topographique de la zone à étudier,
- une carte de rugosité de cette même zone.

* Tous les anémomètres de la région Nord-Pas-de-Calais sont installés à 10 mètres au-dessus du sol, sauf ceux des stations d'Epinoy et du Touquet qui sont implantés à 11 mètres au-dessus du sol.

* Le tableau synthétique des données a été réalisé à l'aide de plusieurs programmes développés par M. Petit-Renaud, Laboratoire de Climatologie de l'Université de Lille I, à savoir :

- VENTFREQ et FREQTOT qui génèrent un tableau en 2 dimensions : 18 classes de vitesse de vent, 18 classes de direction de vent, à partir des données de vent trihoraires moyennées sur 10 minutes;

- FCONVERT qui transforme ce tableau en 2 dimensions dans un format utilisable dans le programme WAsP : 20 classes de vitesse de vent, 12 classes de direction de vent. Dans le programme WAsP, les valeurs des classes de vent correspondent à la valeur maximale de la classe. Ainsi la classe 3 m/s correspond à toutes les valeurs comprises entre 2.1 et 3.0 m/s. Météo France arrondit ces valeurs à l'entier le plus proche, 2 m/s correspond ainsi aux valeurs comprises entre 1.5 et 2.4 m/s. Aussi, les classes utilisées à partir des données de Météo France sont les suivantes : 0.5, 1.5, 2.5, 3.5...

La classe 0.5 correspond aux calmes. En toute logique, lors des situations de calme, il n'y a aucune direction de vent. Le programme WAsP nécessite un

tableau à 2 entrées : vitesse et direction; aussi, dans les calculs ultérieurs nous avons affecté des directions aux valeurs de calme, au prorata des fréquences observées pour les autres classes de vitesse. Les calmes sont généralement peu fréquents : 0.3 % à Epinoy, 0.6 % à Dunkerque, 2.1 % à Boulogne, 2.2 % à Lesquin et 3.3 % au Touquet. Mais ne pas en tenir compte dans le programme WAsP reviendrait à surestimer la vitesse moyenne de 0.1 m/s à 10 mètres au-dessus du sol (voir à ce sujet les tableaux situés en annexe à la page 171).

Ces différents tableaux synthétiques ont été réalisés à partir des données corrigées.

Pour cet atlas éolien régional, le premier réalisé en France à partir de ce logiciel, il a été utilisé les données de l'année 1989 des différentes stations synoptiques et automatiques de la région Nord-Pas-de-Calais. Il faut remarquer que 1989 a été une année peu venteuse : 5.5 m/s à Boulogne au lieu de 5.8 m/s pour la période 1979-1990, 5.9 m/s à Dunkerque au lieu de 6.3 m/s et 4.0 m/s à Lesquin au lieu de 4.4 m/s. Aussi, dans ce premier atlas, les zones favorables sont certainement plus intéressantes qu'elles ne le paraissent.

* La cartographie :

Nous avons numérisé les courbes de niveau ainsi que la rugosité de la région Nord-Pas-de-Calais à partir des cartes de l'IGN au 1/100 000. L'IGN nous a donné l'autorisation d'utiliser ce travail, strictement, dans le cadre de cette recherche universitaire. La numérisation des données cartographiques a été faite à l'aide d'une tablette à digitaliser de 30 x 30 centimètres.

Le choix de l'échelle a été guidé par les objectifs et contraintes suivantes :

- nous voulions réaliser un atlas éolien couvrant, si possible, toute la région;
- sur chaque carte devait figurer une station météorologique;
- nous voulions représenter correctement les traits essentiels du relief.

33 cartes, de 30 x 30 kilomètres, ont ainsi été créées (voir le tableau d'assemblage en annexe à la page 172). La plupart des cartes se "chevauchent"; sur certaines cartes figurent deux stations météorologiques. L'inexistence de station météorologique dans l'Avesnois n'avait pas permis d'évaluer le potentiel éolien de la partie Nord de l'Avesnois. La partie Sud de cette région a pu être étudiée à partir des données de la station automatique de Clairfontaine dans l'Aisne. Toutes les courbes de niveau suivantes ont été numérisées : 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280. Sur les sommets des collines, une courbe intermédiaire a parfois été saisie en complément; de même, dans la Plaine Maritime et le Marais Audomarois, où le relief n'est pas très accusé, nous avons également utilisé la courbe des 10 mètres.

L'échelle utilisée est un compromis entre la volonté d'évaluer la totalité du potentiel éolien régional et de traquer les zones les plus favorables, la taille de la table à digitaliser, la représentation la plus fidèle possible du relief ainsi que la taille du fichier carte (en effet, le WAsP n'accepte pas plus de 10 000 points par carte, ce qui est très souvent insuffisant).

La rugosité décrit l'environnement d'un site et les obstacles freinant la pénétration du vent sur le site.

Le problème principal concerne la valeur de la rugosité à appliquer aux différentes zones. En annexe, on trouvera des indications concernant les longueurs de rugosité.

Dans cet atlas éolien nous avons utilisé les longueurs suivantes :

| | |
|----------------------|-------------|
| mer | 0.001 mètre |
| terres agricoles | 0.03 mètre |
| bocage | 0.1 mètre |
| agglomération, forêt | 0.4 mètre |

Tableau 19 : Longueurs de rugosité adoptées dans l'atlas éolien régional Nord-Pas-de-Calais.

Pour certaines régions rurales, il est difficile d'estimer la valeur de la rugosité : 0.03 ou 0.1 mètre. C'est le cas de la Plaine de la Lys, la Flandre, la Pévèle, la Plaine de la Scarpe, le Boulonnais et le Pays de Licques. Nous avons donc calculé le potentiel éolien successivement avec ces deux valeurs de rugosité. Il semblerait que l'utilisation de la valeur de rugosité 0.1 mètre diminuerait trop la valeur du potentiel éolien. En tenant compte de l'échelle peu précise (1/100 000) et des buts fixés (cartographie régionale, détection des sites les plus intéressants pour l'utilisation de l'énergie éolienne), il n'a été utilisé qu'une seule classe de rugosité pour les terres agricoles : 0.03 mètre, exception faite de l'Avesnois (0.10 mètre).

Une seule valeur de rugosité pour toutes les agglomérations et les forêts ne correspond peut-être pas tout à fait à la réalité; mais, comme il n'y a aucun intérêt à estimer le potentiel éolien dans des agglomérations (problème de place, de bruit, de perception et d'acceptation de l'éolienne par les voisins potentiels) ou dans les forêts, et que très vite, quand on s'éloigne de l'agglomération, quelle que soit la valeur de la rugosité adoptée (0.4 ou 1 mètre), la vitesse du vent "retrouve" sa valeur initiale, nous avons utilisé la valeur de 0.4 mètre pour toutes les agglomérations et les forêts.

Trois cartes de synthèse ont été réalisées à l'aide du WAsP à partir de 3200 points de calcul (voir les cartes en annexe aux pages 173 à 175) :

- vitesse du vent à 10 mètres de hauteur (en m/s),
- densité de puissance à 30.8 mètres de hauteur (en W/m^2),
- électricité produite par une éolienne de 200 kW à 30.8 mètres de hauteur (en MWh/an; 1 MWh = 1000 kWh).

Les meilleurs sites sont tout d'abord les sommets des collines : le Cap Blanc-Nez, le Mont d'Hubert, le Mont de Sombre, le Mont de Couple, le Mont Lambert, Herquelingue, le Mont Saint-Frieux, le Mont de Dannes, avec des vitesses moyennes, à 10 mètres de hauteur, pour l'année 1989, supérieures ou égales à 6 m/s.

Vient ensuite le littoral, zone également très favorable pour l'utilisation de l'énergie éolienne, avec des vitesses moyennes supérieures ou égales à 5 m/s. Certains sommets de l'Artois et les Monts des Flandres ont aussi un potentiel éolien intéressant.

Par contre, le modèle WAsP n'a pas donné pas de bons résultats quand on utilisait les données météorologiques d'une station littorale, Dunkerque, pour estimer le potentiel éolien à l'intérieur des terres, Flandre : les valeurs calculées paraissaient surestimées.

AMELIORATION DE L'ATLAS EOLIEN DE LA REGION NORD-PAS-DE-CALAIS : L'ATLAS DE 1994

A partir des mêmes cartes numériques, nous avons recalculé la vitesse moyenne du vent (paramètre A de la loi de Weibull) à 10 et 30 mètres ainsi que la densité de puissance à 30 mètres de façon régulière, avec un maillage de 500 mètres, à partir des données moyennées sur 12 ans, 1979-1990. La hauteur de 30 mètres correspond à la hauteur de l'axe du rotor des éoliennes de 200-300 kW, taille des machines actuellement installées en Europe. Chaque carte représente généralement un carré de 30 kilomètres de côté, ce qui fait environ 2800 points de calcul par carte.

A partir des conclusions précédemment tirées sur la qualité des emplacements des anémomètres et des informations anémométriques ainsi que sur les anomalies constatées dans les directions de vent (voir les tableaux ci-dessous), nous n'avons retenu que les données des stations de Lesquin et de Boulogne. Les données de Radinghem et de Saulty couvrent une période trop courte (2 ans); celles de Dunkerque n'avait pas donné satisfaction pour la réalisation de l'atlas éolien régional de 1991; elles ont cependant été utilisées pour la région bordant la Mer du Nord pour cet atlas de 1994.

| | DUN | BOU | LET | LES | EPI |
|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Implantation de l'anémomètre | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Données manquantes | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Test de Student | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| Anomalies dans les roses des vents | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 |

Tableau 20 : Qualité des points de mesure du vent dans les stations synoptiques.

| | CGN | SAU | WAN | RAD | LOO | STO | SEN | STE | CRX | DES |
|------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Implantation de l'anémomètre | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 |
| Données manquantes | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 |
| Anomalies dans les roses des vents | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| TOTAL | 2 | 1 | 3 | 1 | 4 | 5 | 4 | 4 | 3 | 3 |

Tableau 21 : Qualité des points de mesure du vent dans les stations automatiques.

Depuis la réalisation du premier atlas de la région Nord-Pas-de-Calais, une 4^{ème} version du WASP a été développée. Dans celle-ci, il est conseillé d'utiliser 0 mètre comme longueur de rugosité pour les surfaces en eau, contre 0.001 mètre dans la précédente version.

La distribution de Weibull s'applique bien aux stations météorologiques du Nord de la France, comme le remarquait déjà le CSTB (*Duchêne-Marullaz, 1977*). La méthode des moindres carrés confirme le bon ajustement de la distribution de Weibull aux données de vent des stations météorologiques de Boulogne, Dunkerque et Lesquin, voir les tableaux situés en annexe aux pages 176 à 180.

La vitesse moyenne du vent, calculée à partir du paramètre A de la loi de Weibull, exprimé en m/s, a été calculée tous les 500 mètres à l'aide de l'option Resourcefile du logiciel WASP. Le maillage est suffisamment fin pour que l'on ait un aperçu des zones les plus intéressantes, comme l'a montré une étude allemande qui avait pour but la recherche de sites pour l'installation de parcs éoliens dans les 10 districts de la région côtière du Land de Niedersachsen (*T. Pahlke, G.J. Gerdes, A. Keuper, 1993*).

Cette option a l'avantage de calculer automatiquement, pour tous les points d'une carte, selon un maillage choisi par l'utilisateur (ici 500 mètres) les paramètres A et k de la loi de Weibull ainsi que la densité de puissance, globalement, mais aussi pour les 12 secteurs de direction de vent.

Par contre, l'option Resourcefile ne calcule pas la vitesse moyenne du vent, V_m . Celle-ci peut-être reliée aux paramètres A et k par la formule suivante (*P. Duchêne-Marullaz, C. Sacré, 1984 et I. Troen, E. Petersen, 1991*) :

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

$$\text{avec } \Gamma = (0.2923/k + 0.6851 * k^{(-0.1)})^{(1/k)}$$

On trouvera en annexe à la page 181 un tableau qui permet de connaître la variation de $\Gamma (1 + 1/k)$ en fonction du paramètre k. Pour les stations de la région Nord-Pas-de-Calais, le coefficient k est généralement compris entre 1.7 et 2.1, aussi la vitesse moyenne d'un site est généralement égale à 0.89 fois la valeur du coefficient A.

A partir d'une quinzaine de points des cartes de Boulogne et de Loos-en-Gohelle, il a été calculé à la fois la vitesse moyenne du vent à 10 mètres de hauteur ainsi que la valeur du paramètre A de la loi de Weibull. Un graphique situé en annexe à la page 182 montre que l'on peut déduire graphiquement la vitesse moyenne, V_m , du paramètre A. Un ajustement par la méthode des moindres carrés, montre une droite d'équation $V_m = 0.9 A$.

La valeur de A est toujours supérieure à celle de la vitesse moyenne du vent. Le tableau ci-dessous indique, pour les 3 principales stations météorologiques de la région Nord-Pas-de-Calais, les valeurs de A et de la vitesse moyenne du vent calculées par le logiciel WAsP ainsi que celle mesurée par MétéoFrance à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol.

| Stations météorologiques | A et k | Vitesse moyenne du vent recalculée (WAsP) | Vitesse moyenne du vent mesurée |
|--------------------------|--------------|-------------------------------------------|---------------------------------|
| Boulogne | 6.6 m/s 1.79 | 5.9 m/s | 5.8 m/s |
| Dunkerque | 7.0 m/s 2.00 | 6.2 m/s | 6.2 m/s |
| Lesquin | 4.9 m/s 1.67 | 4.4 m/s | 4.4 m/s |

Tableau 22 : Comparaison des valeurs de A et de Vm à 10 mètres au-dessus du sol. 1979-1990.

Les vitesses moyennes de vent recalculées par le logiciel WAsP sont très proches de celles mesurées par MétéoFrance à 10 mètres au-dessus du sol (écart de 0.0 à 0.1 m/s).

Un programme informatique réalisé par F. David, d'Espace Eolien Développement permet de transformer les valeurs des paramètres A obtenus par l'option Resourcefile du WAsP en vitesse moyenne grâce à la formule, $V_m = A \Gamma (1 + 1/k)$. Ce programme permet surtout de pouvoir lire les fichiers issus de l'option Resourcefile et de tracer des cartes (voir les cartes situées dans l'atlas).

Les cartes de synthèse, situées aux pages suivantes, ont été effectuées à partir des données météorologiques de Boulogne et de Lesquin.

Carte de la vitesse moyenne à 10 mètres :

Pour la localisation de la courbe des 6 m/s, nous avons utilisé les données météorologiques de Boulogne pour les régions proches de la Manche, et celles de Dunkerque pour celles proches de la Mer du Nord. Pour la position de la courbe des 5 m/s, nous avons utilisé les données météorologiques de Boulogne pour le secteur proche de la Manche et de la Mer du Nord. En effet, pour les régions proches de la Mer du Nord, la vitesse moyenne du vent décroît trop lentement vers l'intérieur des terres, quand on utilise les données météorologiques de Dunkerque, pour que cela soit réaliste.

Carte de la vitesse moyenne à 30 mètres :

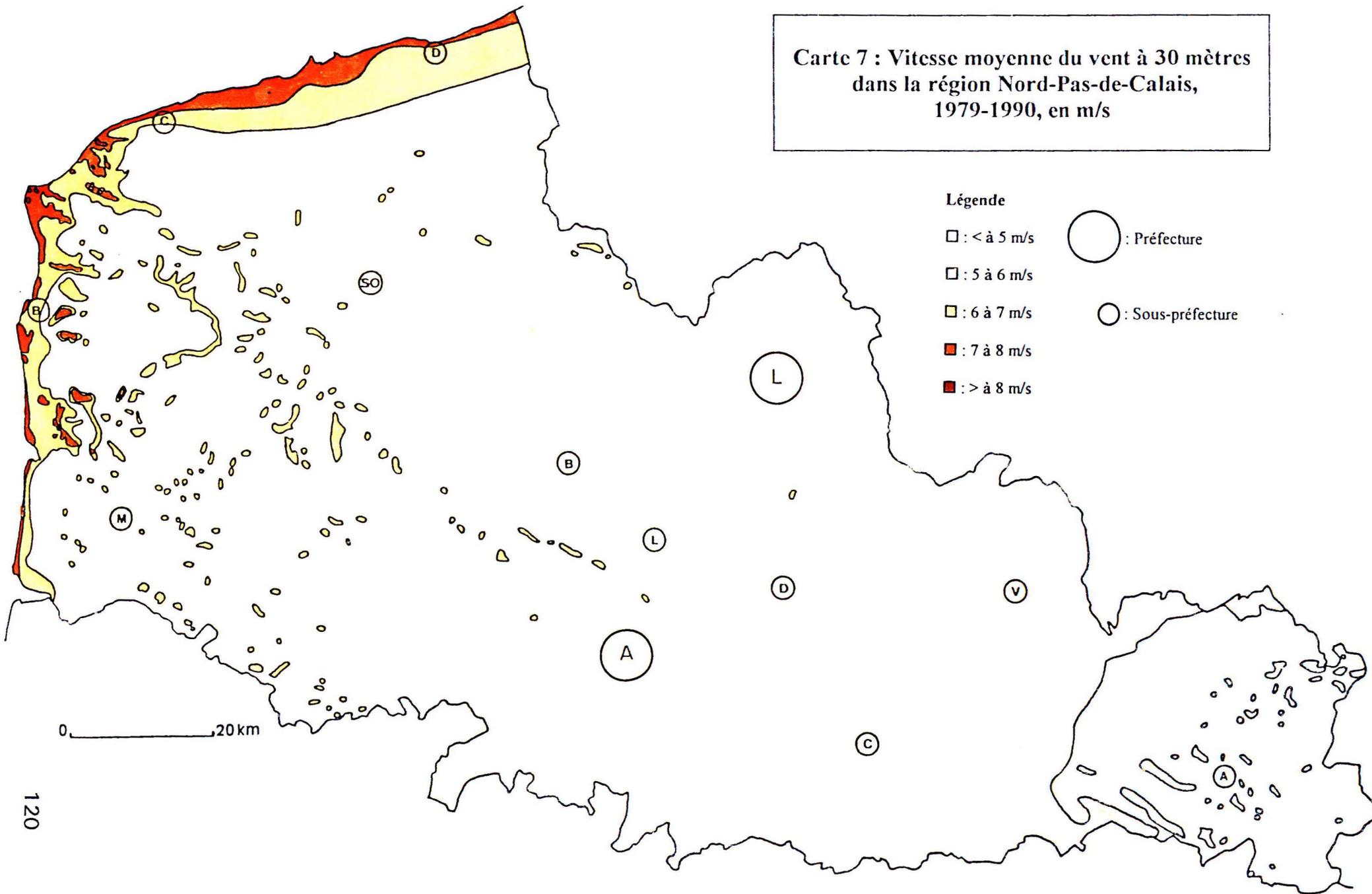
Pour la localisation de la courbe des 7 m/s, nous avons utilisé les données météorologiques de Boulogne pour les régions proches de la Manche, et celles de

Dunkerque pour celles proches de la Mer du Nord. Pour la position de la courbe des 6 m/s, nous avons utilisé les données météorologiques de Boulogne pour le secteur proche de la Manche et de la Mer du Nord.

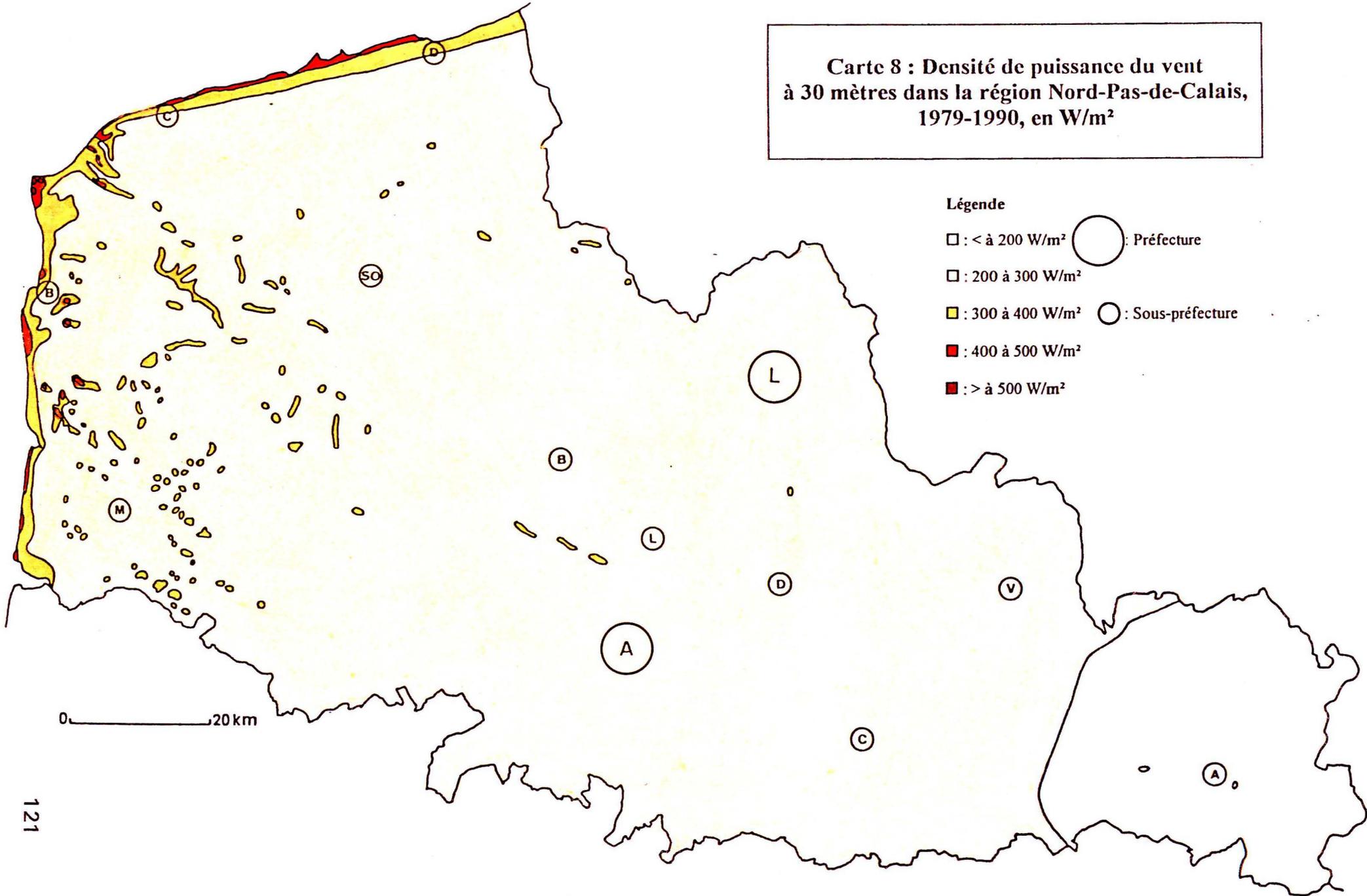
Carte de la densité de puissance à 30 mètres :

Pour les régions proches du littoral, nous avons utilisé les données de Boulogne, pour l'intérieur des terres nous avons utilisé celles de Lesquin. Il faut remarquer que les valeurs sont assez voisines pour ce paramètre. En effet, la différence est généralement inférieure ou égale à 10 %.

**Carte 7 : Vitesse moyenne du vent à 30 mètres
dans la région Nord-Pas-de-Calais,
1979-1990, en m/s**



Carte 8 : Densité de puissance du vent à 30 mètres dans la région Nord-Pas-de-Calais, 1979-1990, en W/m²



Légende

- : < à 200 W/m² ○ : Préfecture
- : 200 à 300 W/m²
- : 300 à 400 W/m² ○ : Sous-préfecture
- : 400 à 500 W/m²
- : > à 500 W/m²

RESULTATS ET COMMENTAIRES SUR L'ATLAS DE 1994

Les zones les plus favorables sont le littoral de la Manche et de la Mer du Nord, le mont de Dannes, le mont St-Frieux, le mont Violette, la cuesta du Boulonnais, le mont d'Herquelingue, le mont Lambert, les hauteurs de Wimille, le mont de la Louve, le Mont de Couple, le Mont de Sombre, le Mont d'Hubert ainsi que quelques sites en Artois.

On remarque aussi une grande homogénéité de la vitesse moyenne du vent à l'intérieur des terres. Pour la majeure partie de la région, la vitesse moyenne du vent à 10 mètres au-dessus du sol est comprise entre 4 et 5 m/s. Ce niveau est dépassé sur les points élevés tels que les collines d'Artois.

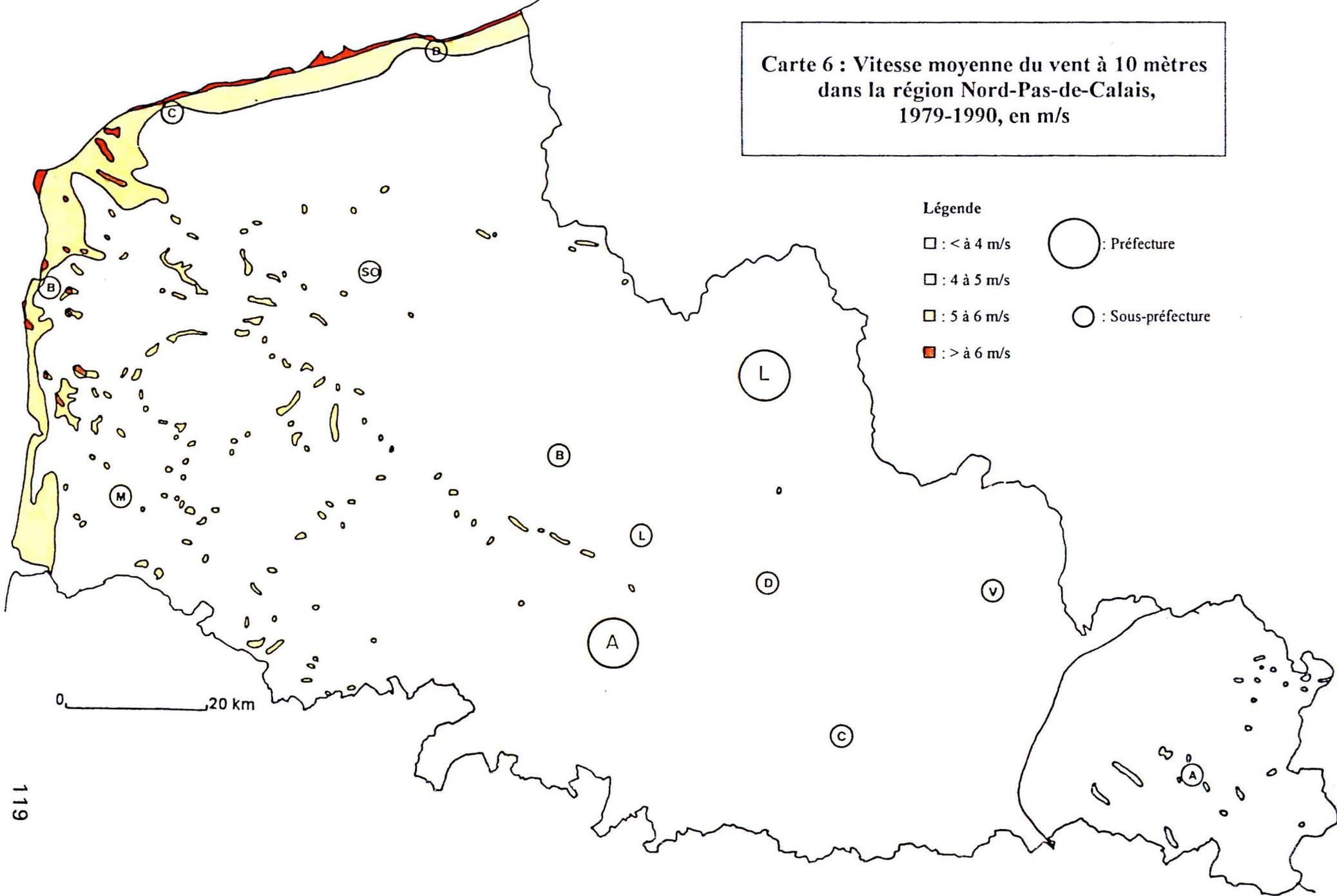
La plus grande rugosité de l'Avesnois explique une vitesse moyenne plus faible, confirmée par une vitesse moyenne mesurée par MétéoFrance de 3.3 et 3.5 m/s à Clairfontaine dans le Nord de l'Aisne respectivement pour les années 1989 et 1990 (voir les tableaux situés en annexe à la page 79 à 81).

Afin de quantifier la ressource éolienne dans la région et de repérer avec plus de précision les sites favorables, nous avons calculé pour chaque carte le nombre de points dépassant une vitesse seuil donnée. Les classes suivantes ont été établies :

- > 4 m/s,
- 4 à 5 m/s,
- 5 à 6 m/s,
- 6 à 7 m/s,
- > 7 m/s.

Le tableau ci-après montre que c'est dans les régions proches du littoral que la ressource éolienne est la plus intéressante.

Carte 6 : Vitesse moyenne du vent à 10 mètres
dans la région Nord-Pas-de-Calais,
1979-1990, en m/s



| | LESQUIN | | | | | BOULOGNE | | | | |
|----------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|--------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| | <4 m/s | 4 à 5 m/s | 5 à 6 m/s | 6 à 7 m/s | >7 m/s | <4 m/s | 4 à 5 m/s | 5 à 6 m/s | 6 à 7 m/s | > 7 m/s |
| Vron Nord-Ouest | 240 | 2477 | 99 | | | 99 | 2078 | 638 | 1 | |
| Boulogne Sud-Est | 265 | 2021 | 415 | 11 | | 110 | 1541 | 1018 | 41 | 2 |
| Boulogne Nord-Est | 162 | 1750 | 399 | 15 | 1 | 76 | 1403 | 791 | 55 | 2 |
| Calais Sud-Ouest | 44 | 755 | 131 | 4 | 1 | | 365 | 556 | 13 | 1 |
| Dunkerque Sud-Ouest | 100 | 2152 | 62 | | | 20 | 1881 | 409 | 4 | |
| Dunkerque Sud-Est | 99 | 2527 | 35 | | | 11 | 2482 | 168 | | |
| Bernaville Nord-Ouest | 252 | 1842 | 26 | | | 123 | 1623 | 374 | | |
| Radinghem Sud-Ouest | 294 | 2442 | 73 | | | 109 | 2095 | 605 | | |
| Radinghem Nord-Ouest | 215 | 2504 | 90 | | | 75 | 2091 | 642 | 1 | |
| Radinghem Sud-Est | 179 | 2591 | 39 | | | 71 | 2335 | 403 | | |
| Radinghem Nord-Est | 190 | 2566 | 53 | | | 64 | 2327 | 418 | | |
| Steenvoorde Nord-Est | 152 | 2636 | 20 | 1 | | 81 | 2568 | 157 | 3 | |
| St-Omer Nord-Est | 121 | 2682 | 6 | | | 64 | 2618 | 126 | 1 | |
| St-Omer Nord-Ouest | 214 | 2564 | 31 | | | 84 | 2548 | 176 | 1 | |
| Lesquin Nord-Est | 872 | 1937 | | | | 635 | 2166 | 8 | | |
| Lesquin Nord-Ouest | 655 | 2151 | 3 | | | 487 | 2282 | 40 | | |
| Lesquin Sud-Est | 379 | 2428 | 2 | | | 153 | 2628 | 28 | | |
| Loos-en-Gohelle Nord-Est | 739 | 2069 | 1 | | | 495 | 2307 | 7 | | |
| Loos-en-Gohelle Nord-Ouest | 485 | 2313 | 11 | | | 268 | 2490 | 50 | 1 | |
| Saulty Nord-Est | 382 | 2404 | 22 | 1 | | 228 | 2434 | 145 | 2 | |
| Saulty Nord-Ouest | 193 | 2604 | 12 | | | 79 | 2507 | 223 | | |
| Saulty Sud-Est | 150 | 2659 | | | | 81 | 2607 | 121 | | |
| Saulty Sud-Ouest | 304 | 2489 | 16 | | | 122 | 2250 | 437 | | |
| Epinoy Nord-Est | 216 | 2593 | | | | 78 | 2659 | 72 | | |
| Epinoy Sud-Est | 161 | 2648 | | | | 54 | 2624 | 131 | | |
| Wancourt Nord-Est | 832 | 1975 | 2 | | | 592 | 2172 | 45 | | |
| Wancourt Sud-Est | 107 | 2702 | | | | 21 | 2743 | 45 | | |
| La Sentinelle Nord-Est | 680 | 2128 | 1 | | | 416 | 2362 | 31 | | |
| La Sentinelle Sud-Est | 1139 | 1670 | | | | 738 | 1993 | 78 | | |
| Maubeuge Nord-Est | 1919 | 577 | | | | 1117 | 1377 | 2 | | |
| Clairfontaine Nord-Ouest | 2145 | 187 | | | | 1195 | 1137 | | | |
| Clairfontaine Nord-Est | 2739 | 70 | | | | 2000 | 809 | | | |

Tableau 23 : Nombre de points pour chaque classe de vitesse de vent à 10 mètres au-dessus du sol à partir des données de Lesquin et de Boulogne.

| | LESQUIN | | | | | BOULOGNE | | | | |
|----------------------------|---------|-----------|-----------|-----------|--------|----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| | <4 m/s | 4 à 5 m/s | 5 à 6 m/s | 6 à 7 m/s | >7 m/s | <4 m/s | 4 à 5 m/s | 5 à 6 m/s | 6 à 7 m/s | > 7 m/s |
| Vron Nord-Ouest | 240 | 2477 | 99 | | | 99 | 2078 | 638 | 1 | |
| Boulogne Sud-Est | 265 | 2021 | 415 | 11 | | 110 | 1541 | 1018 | 41 | 2 |
| Boulogne Nord-Est | 162 | 1750 | 399 | 15 | 1 | 76 | 1403 | 791 | 55 | 2 |
| Calais Sud-Ouest | 44 | 755 | 131 | 4 | 1 | | 365 | 556 | 13 | 1 |
| Dunkerque Sud-Ouest | 100 | 2152 | 62 | | | 20 | 1881 | 409 | 4 | |
| Dunkerque Sud-Est | 99 | 2527 | 35 | | | 11 | 2482 | 168 | | |
| Bernaville Nord-Ouest | 252 | 1842 | 26 | | | 123 | 1623 | 374 | | |
| Radinghem Sud-Ouest | 294 | 2442 | 73 | | | 109 | 2095 | 605 | | |
| Radinghem Nord-Ouest | 215 | 2504 | 90 | | | 75 | 2091 | 642 | 1 | |
| Radinghem Sud-Est | 179 | 2591 | 39 | | | 71 | 2335 | 403 | | |
| Radinghem Nord-Est | 190 | 2566 | 53 | | | 64 | 2327 | 418 | | |
| Steenvoorde Nord-Est | 152 | 2636 | 20 | 1 | | 81 | 2568 | 157 | 3 | |
| St-Omer Nord-Est | 121 | 2682 | 6 | | | 64 | 2618 | 126 | 1 | |
| St-Omer Nord-Ouest | 214 | 2564 | 31 | | | 84 | 2548 | 176 | 1 | |
| Lesquin Nord-Est | 872 | 1937 | | | | 635 | 2166 | 8 | | |
| Lesquin Nord-Ouest | 655 | 2151 | 3 | | | 487 | 2282 | 40 | | |
| Lesquin Sud-Est | 379 | 2428 | 2 | | | 153 | 2628 | 28 | | |
| Loos-en-Gohelle Nord-Est | 739 | 2069 | 1 | | | 495 | 2307 | 7 | | |
| Loos-en-Gohelle Nord-Ouest | 485 | 2313 | 11 | | | 268 | 2490 | 50 | 1 | |
| Saulty Nord-Est | 382 | 2404 | 22 | 1 | | 228 | 2434 | 145 | 2 | |
| Saulty Nord-Ouest | 193 | 2604 | 12 | | | 79 | 2507 | 223 | | |
| Saulty Sud-Est | 150 | 2659 | | | | 81 | 2607 | 121 | | |
| Saulty Sud-Ouest | 304 | 2489 | 16 | | | 122 | 2250 | 437 | | |
| Epinoy Nord-Est | 216 | 2593 | | | | 78 | 2659 | 72 | | |
| Epinoy Sud-Est | 161 | 2648 | | | | 54 | 2624 | 131 | | |
| Wancourt Nord-Est | 832 | 1975 | 2 | | | 592 | 2172 | 45 | | |
| Wancourt Sud-Est | 107 | 2702 | | | | 21 | 2743 | 45 | | |
| La Sentinelle Nord-Est | 680 | 2128 | 1 | | | 416 | 2362 | 31 | | |
| La Sentinelle Sud-Est | 1139 | 1670 | | | | 738 | 1993 | 78 | | |
| Maubeuge Nord-Est | 1919 | 577 | | | | 1117 | 1377 | 2 | | |
| Clairfontaine Nord-Ouest | 2145 | 187 | | | | 1195 | 1137 | | | |
| Clairfontaine Nord-Est | 2739 | 70 | | | | 2000 | 809 | | | |

Tableau 23 : Nombre de points pour chaque classe de vitesse de vent à 10 mètres au-dessus du sol à partir des données de Lesquin et de Boulogne.

VALIDATION DES RESULTATS

Pour vérifier qu'il est possible de déterminer correctement la vitesse du vent et la densité de puissance sur n'importe quel point de la région, nous avons intercomparé les données des stations météorologiques de la région Nord-Pas-de-Calais, les tableaux suivants présentent les résultats de ces intercomparaisons.

| | A | k | Vm |
|-----------------------------------|---------|------|---------|
| à partir des données de Boulogne | 6.6 m/s | 1.79 | 5.9 m/s |
| à partir des données de Dunkerque | 7.5 m/s | 1.67 | 6.7 m/s |
| à partir des données de Lesquin | 6.4 m/s | 1.64 | 5.7 m/s |

Tableau 24 : Valeurs de A, k et Vm de Boulogne calculées (WAsP) à partir des données de différentes stations météorologiques. 1979-1990.

| | A | k | Vm |
|-----------------------------------|---------|------|---------|
| à partir des données de Boulogne | 6.4 m/s | 1.90 | 5.6 m/s |
| à partir des données de Dunkerque | 7.0 m/s | 2.00 | 6.2 m/s |
| à partir des données de Lesquin | 6.0 m/s | 1.83 | 5.3 m/s |

Tableau 25 : Valeurs de A, k et Vm de Dunkerque calculées (WAsP) à partir des données de différentes stations météorologiques. 1979-1990.

| | A | k | Vm |
|-----------------------------------|---------|------|---------|
| à partir des données de Boulogne | 5.2 m/s | 1.79 | 4.6 m/s |
| à partir des données de Dunkerque | 5.9 m/s | 1.77 | 5.2 m/s |
| à partir des données de Lesquin | 4.9 m/s | 1.67 | 4.4 m/s |

Tableau 26 : Valeurs de A, k et Vm de Lesquin calculées (WAsP) à partir des données de différentes stations météorologiques. 1979-1990.

A la lecture de ces tableaux, on remarque que les comparaisons entre Boulogne et Lesquin sont relativement bonnes : c'est-à-dire qu'il est possible de bien représenter la distribution du vent et la densité de puissance sur un même territoire avec l'une ou l'autre de ces deux stations. Cependant, les données de Boulogne surestiment légèrement les valeurs de la vitesse du vent (+ 0.2 m/s à Lesquin) et de la densité de puissance.

Par contre, les comparaisons ne sont pas bonnes entre Dunkerque et les autres stations. Les données de Dunkerque ont tendance à surestimer la vitesse du vent dans l'intérieur des terres (+ 0.8 m/s à Lesquin). Un essai de cartographie a été fait à partir des données météorologiques de Dunkerque. Dans ce cas, la décroissance de la vitesse du vent dans la Flandre est beaucoup trop faible pour être réaliste (voir les cartes de Dunkerque dans l'atlas). Au niveau de la zone côtière, on distingue 3 types de climatologie des vents : un régime maritime, un régime continental et un régime mixte. La largeur de la zone côtière varie en fonction du climat et de la topographie. Dans l'atlas éolien européen, on considère qu'aux Pays-Bas les conditions continentales sont atteintes brusquement vers 4 kilomètres (*I. Troen, E. Petersen, 1991*).

Des phénomènes de brise peuvent aussi apparaître dans les régions côtières. La brise de mer souffle de la mer vers la terre durant la journée, tandis que la brise de terre souffle de la terre vers la mer durant la nuit. Ces vents sont dûs à des phénomènes thermiques qui créent des différences de pression entre mer et terre. Les directions de ces vents locaux sont généralement perpendiculaires au trait de côte et influencent donc la forme des roses des vents. Cependant, les apports des brises de mer et de terre au potentiel d'énergie éolienne sont faibles en raison de la faiblesse des vitesses de ces vents qui ne peuvent se développer dans les zones côtières qu'en l'absence de circulation zonale.

La station de Dunkerque ne permet pas d'estimer correctement le potentiel éolien à une distance supérieure à quelques kilomètres du bord de mer. A partir de quelques kilomètres à l'intérieur des terres, il vaut mieux utiliser celles de Boulogne ou de Lesquin.

Le Nord-Pas-de-Calais possède 15 points de mesures plus 3 autres points mesurés par Espace Eolien Développement. Il est intéressant de calculer, avec le logiciel WAsP, la vitesse moyenne de ces 18 points à partir des données de Lesquin et de Boulogne et de les comparer avec les valeurs mesurées ou estimées.

| | A, k et Vm à partir des données de Dunkerque | A, k et Vm à partir des données de Boulogne | A, k et Vm à partir des données de Lesquin | Vitesse moyenne mesurée ou estimée du site | Qualité de l'emplacement de l'anémomètre |
|---------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|
| Dunkerque | 7.0 2.00 6.2 | 6.4 1.90 5.6 | 6.0 1.83 5.3 | 6.2 m/s * | Bonne |
| Boulogne | 7.5 1.67 6.7 | 6.6 1.79 5.9 | 6.4 1.64 5.7 | 5.8 m/s * | Moyenne |
| Le Touquet | 6.0 1.86 5.3 | 5.3 1.91 4.7 | 5.0 1.79 4.4 | 4.5 m/s * | Moyenne |
| Lesquin | 5.9 1.77 5.2 | 5.2 1.79 4.6 | 4.9 1.67 4.4 | 4.4 m/s * | Moyenne |
| Epinoy | 6.2 1.79 5.5 | 5.4 1.79 4.8 | 5.1 1.69 4.5 | 5.2 m/s * | Bonne |
| Cap Gris-Nez | 8.3 1.76 7.4 | 7.4 1.90 6.6 | 7.0 1.76 6.3 | 6.8 m/s ** | Bonne |
| Saulty | 6.2 1.79 5.5 | 5.5 1.80 4.9 | 5.2 1.69 4.6 | 4.5 m/s ** | Bonne |
| Wancourt | 5.9 1.79 5.2 | 5.1 1.78 4.6 | 4.8 1.69 4.3 | 3.9 m/s ** | Moyenne |
| Radinghem | 6.0 1.64 5.4 | 5.3 1.72 4.8 | 5.0 1.60 4.5 | 4.5 m/s ** | Bonne |
| Loos-en-Gohelle | 5.1 1.83 4.5 | 4.5 1.79 4.0 | 4.2 1.71 3.8 | 3.7 m/s ** | Mauvaise |
| St-Omer | 5.3 1.85 4.7 | 4.7 1.80 4.2 | 4.4 1.70 3.9 | 2.8 m/s ** | Mauvaise |
| La Sentinelle | 5.7 1.83 5.1 | 5.1 1.77 4.5 | 4.8 1.69 4.3 | 3.6 m/s ** | Mauvaise |
| Steenvoorde | 5.5 1.85 4.9 | 4.9 1.78 4.3 | 4.5 1.73 4.0 | 3.1 m/s ** | Mauvaise |
| Croix-en-Ternois | 6.2 1.79 5.5 | 5.4 1.78 4.8 | 5.1 1.68 4.5 | 4.2 m/s ** | Moyenne |
| Desvres | 6.9 1.78 6.2 | 6.1 1.78 5.4 | 5.7 1.69 5.1 | 4.2 m/s ** | Moyenne |
| Fresnes-lès-Montauban *** | 6.2 1.79 5.5 | 5.4 1.78 4.8 | 5.1 1.68 4.5 | 3.2 m/s ** | Mauvaise |
| Ambleteuse *** | 6.6 1.80 5.9 | 5.9 1.92 5.2 | 5.6 1.78 5.0 | 5.2 m/s ** | Moyenne |
| Canal des Dunes *** | 7.2 1.96 6.4 | 6.5 1.89 5.8 | 6.2 1.81 5.5 | 6.7 m/s ** | Bonne |

Tableau 27 : Comparaisons entre WAsP et valeurs mesurées ou estimées par EED à 10 mètres de hauteur.

A et Vm en m/s, k sans unité, * : valeur mesurée, ** : valeur estimée, *** : points de mesures d'Espace Eolien Développement (EED).

Pour les stations de l'intérieur, c'est à partir des données météorologiques de Lesquin que l'on obtient les meilleurs résultats avec le logiciel WAsP : écart de 0.0 à 0.1 m/s pour 4 des stations de l'intérieur (Lesquin, Loos-en-Gohelle, Radinghem et Saulty). Par contre, les résultats ne sont pas bons pour les stations dont l'emplacement est de mauvaise qualité : Fresnes-lès-Montauban, différence de 1.3 m/s, St-Omer, 1.1 m/s, Steenvoorde, 0.9 m/s, La Sentinelle, 0.7 m/s, Wancourt, 0.4 m/s, Croix-en-Ternois et Desvres, 0.3 m/s.

Pour les stations proches de la Manche, les résultats sont meilleurs avec le logiciel WAsP quand on utilise les données de vent de la station de Boulogne :

écart de 0.0 à 0.2 m/s pour 4 des points de mesures (Boulogne, Ambleteuse, Le Touquet et Cap Gris-Nez).

Pour les stations proches de la Mer du Nord, c'est avec les données météorologiques de Dunkerque que l'on obtient les meilleurs résultats : écart de 0.0 à 0.3 m/s pour Dunkerque et le Canal des Dunes. Sur ce dernier point, les calculs faits avec le logiciel WAsP donnent à 30 mètres les mêmes résultats que ceux issus des mesures faites à ce niveau.

PRODUCTION D'ELECTRICITE A PARTIR DES EOLIENNES

Le logiciel WAsP permet aussi de calculer la production d'électricité que peut produire une éolienne. Le marché actuel des éoliennes se situe autour des machines de 300 à 500 kilowatts, c'est-à-dire des éoliennes ayant des pâles d'environ 15 à 20 mètres de longueur. La hauteur du pylône portant le rotor est comprise entre 30 et 40 mètres. Plusieurs fabricants construisent cette gamme de machines, qui ne produisent d'ailleurs pas toutes la même quantité d'énergie. Il aurait été arbitraire de faire des cartes de production d'électricité à partir d'une seule machine et trop fastidieux de les faire à partir de toutes les machines du marché. Aussi, les cartes de densité de puissance à 30 mètres permettent d'estimer la ressource éolienne.

Il est possible d'estimer la production d'électricité de telle ou telle éolienne en multipliant cette densité de puissance par un ratio propre à chaque machine.

A partir d'une vingtaine de points des cartes de Vron Nord-Ouest, nous avons calculé pour différentes machines, voir les caractéristiques en annexe page 183, la vitesse moyenne du vent et la densité de puissance à 30 mètres ainsi que la production d'électricité.

Deux graphiques (annexe page 184) montrent que l'on peut déduire la production d'électricité à partir de la vitesse moyenne du vent et la densité de puissance. Un ajustement par la méthode des moindres carrés permet d'optimiser les paramètres des différentes droites.

Pour les éoliennes de 300 kilowatts la production d'électricité varie pour chaque machine mais est plus ou moins égale à :

$$P = 1.5 D_p + 75$$

$$P = 1.9 V_m^3 + 90$$

avec P, la production d'électricité éolienne en MWh/an,

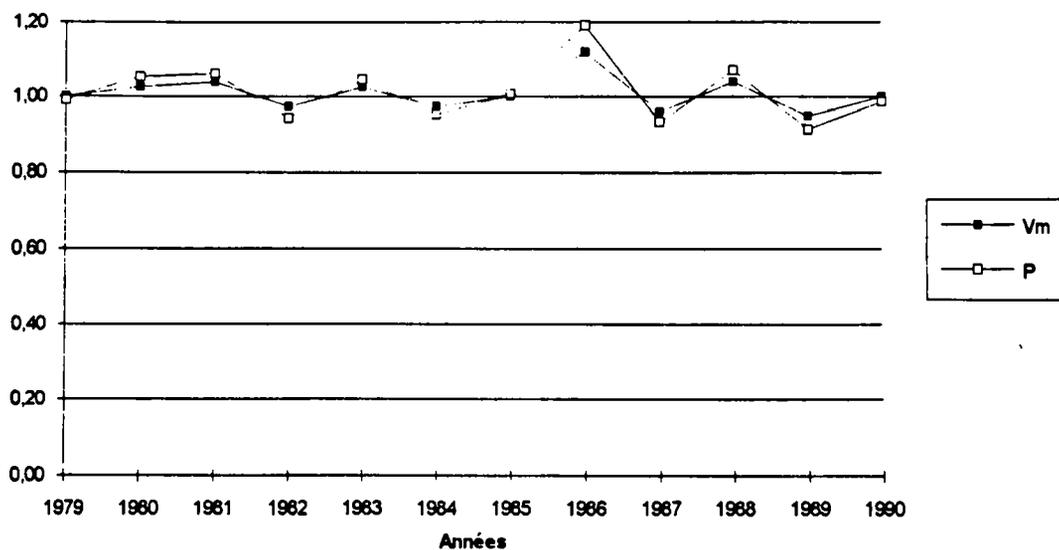
D_p la densité de Puissance en W/m^2 ,

V_m , la vitesse moyenne du vent à 30 mètres en m/s.

En annexe page 185, on trouvera pour chaque éolienne, les équations permettant de déduire la production d'électricité à partir de la densité de puissance et de la vitesse moyenne du vent à 30 mètres.

VARIATIONS ANNUELLES DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE

Comme nous l'avons montré précédemment (voir pages 83 à 89), la vitesse du vent fluctue d'une année à l'autre. A partir des données de vent trihoraires de Dunkerque, nous avons établi 12 tableaux de données annuelles qui ont été traités par le logiciel WASP (annexe page 186). Au Canal des Dunes, futur lieu d'implantation du premier parc éolien de la région Nord-Pas-de-Calais, il a été calculé pour chaque année, la vitesse moyenne du vent à 30 mètres ainsi que la production d'électricité de 3 différentes éoliennes de 300 kW. Le graphique ci-dessous montre les variations relatives de la vitesse du vent et de la production d'électricité d'une éolienne de 300 kW.

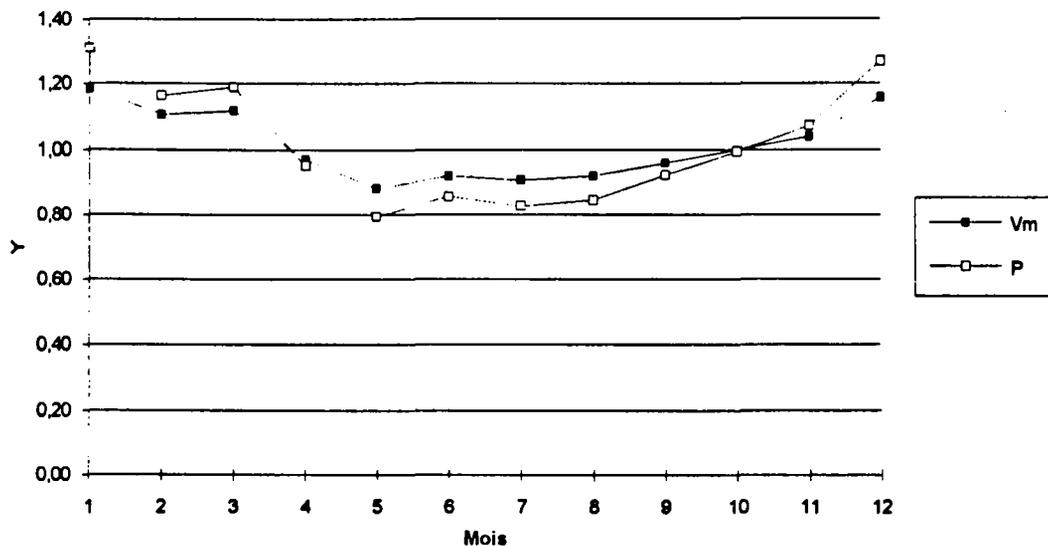


Graphique 12 : Variations relatives annuelles de la vitesse du vent et de la production d'électricité d'une éolienne de 300 kW au Canal des Dunes (Dunkerque).

La production d'électricité éolienne est une fonction cubique de la vitesse du vent, aussi les variations de la production sont plus importantes que celles de la vitesse moyenne du vent, comme le montre le graphique ci-dessus. Alors que la vitesse moyenne fluctue d'environ 5 à 10 % autour de sa valeur moyenne, la production d'électricité d'origine éolienne varie de 10 à 20 % autour de sa valeur moyenne.

VARIATIONS MENSUELLES DE LA PRODUCTION D'ELECTRICITE

Dans la région Nord-Pas-de-Calais, les mois les plus venteux sont ceux de la saison froide. A partir des données de vent trihoraires de Dunkerque, nous avons établi 12 tableaux de données mensuelles qui ont été traités par le logiciel WAsP (annexe page 186). Au Canal des Dunes, il a été calculé pour chaque mois, la vitesse moyenne du vent à 30 mètres ainsi que la production d'électricité de 3 différentes éoliennes de 300 kW. Le graphique ci-dessous montre les variations relatives de la vitesse du vent et de la production d'électricité d'une éolienne de 300 kW.



Graphique 13 : Variations relatives mensuelles de la vitesse du vent et de la production d'électricité d'une éolienne de 300 kW au Canal des Dunes (Dunkerque).

Comme pour les variations annuelles, les variations de la production sont plus importantes que celles de la vitesse moyenne du vent, comme le montre le graphique ci-dessus. Alors que la vitesse moyenne fluctue d'environ 10 à 20 % autour de sa valeur moyenne, la production d'électricité d'origine éolienne varie de 20 à 30 % autour de sa valeur moyenne.

La tarification à 2 postes d'EDF (été/hiver) est bien valorisée à Dunkerque, car sur les 5 mois d'hiver, la production mensuelle d'électricité est supérieure à la valeur moyenne mensuelle. Ainsi, sur les 5 mois d'hiver, une éolienne (BONUS) produirait 464 MWh, soit 49 % de la production totale de l'année.

ESTIMATION DES SITES POUVANT ACCUEILLIR DES PARCS EOLIENS

Afin de diminuer le coût d'achat des éoliennes, des travaux et de la connexion au réseau électrique, les maîtres d'ouvrages (électriciens, compagnies privées) installent sur un même lieu plusieurs éoliennes. Le courant produit est intégralement vendu au gestionnaire du réseau électrique. La rentabilité du projet dépend de la ressource éolienne, du coût des machines, du coût du rachat du courant produit, mais aussi de la distance au point de connexion. La majeure partie de la production d'électricité d'origine éolienne se fait à partir des parcs éoliens (*Climat-Energie-Environnement, 1992*).

La taille des parcs éoliens va de quelques machines à plusieurs centaines d'éoliennes, c'est-à-dire de quelques centaines de kilowatts à quelques dizaines de mégawatts. Dans la région Nord-Pas-de-Calais, un parc éolien va démarrer au début de l'année 1995 à Mardyck et Loon-Plage. Il comportera 9 éoliennes de 300 kW, soit une puissance totale de 2.7 MW.

Pour l'instant, les parcs éoliens sont installés sur la terre ferme, cependant le potentiel éolien maritime ("offshore") commence à être exploité depuis 1991. Les principaux avantages en sont un potentiel éolien beaucoup plus important, une turbulence plus faible, une vaste étendue où l'on peut implanter des parcs. Par contre, les inconvénients sont le surcoût pour la construction, la connexion au réseau et l'entretien, les conditions de fonctionnement plus dures (sel, tempête), les conflits avec la navigation maritime et les protecteurs de la nature.

En France, les professionnels de l'énergie éolienne estiment que l'on peut développer des parcs éoliens à partir d'une vitesse moyenne de 7 m/s à 30 mètres de hauteur.

Dans la région Nord-Pas-de-Calais, nous avons donc retenu 7 m/s à 30 mètres de hauteur comme vitesse seuil permettant, dans les conditions actuelles, le développement de l'énergie éolienne en milieu terrestre. La carte ci-après montre les zones où cette vitesse de vent est dépassée. Cela concerne 24 secteurs, le littoral ainsi que les collines proches de celui-ci, zones qui représentent environ 220 km², soit 1.8 % du territoire régional.

La courbe d'isovitesse 7 m/s a ensuite été digitalisée et introduite comme couche cartographique dans le Système d'Information Géographique (SIG) du Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais (*F. Paul, C. Petit, 1994*). Les contraintes environnementales ont ensuite été prises en compte. En effet, il est très difficile, voire impossible d'installer des parcs éoliens dans les zones naturelles protégées : sites classés, sites inscrits, arrêté de protection de biotope, réserves naturelles, réserves biologiques domaniales, terrains du Conservatoire de l'Espace Littoral et des Rivages Lacustres, terrains du Conseil Général. De même, bien qu'elles n'ont aucune valeur juridique directe, aucun parc éolien ne devrait être implanté dans les ZNIEFF de type I (Zone Naturelle, d'Intérêt Ecologique, Faunistique et

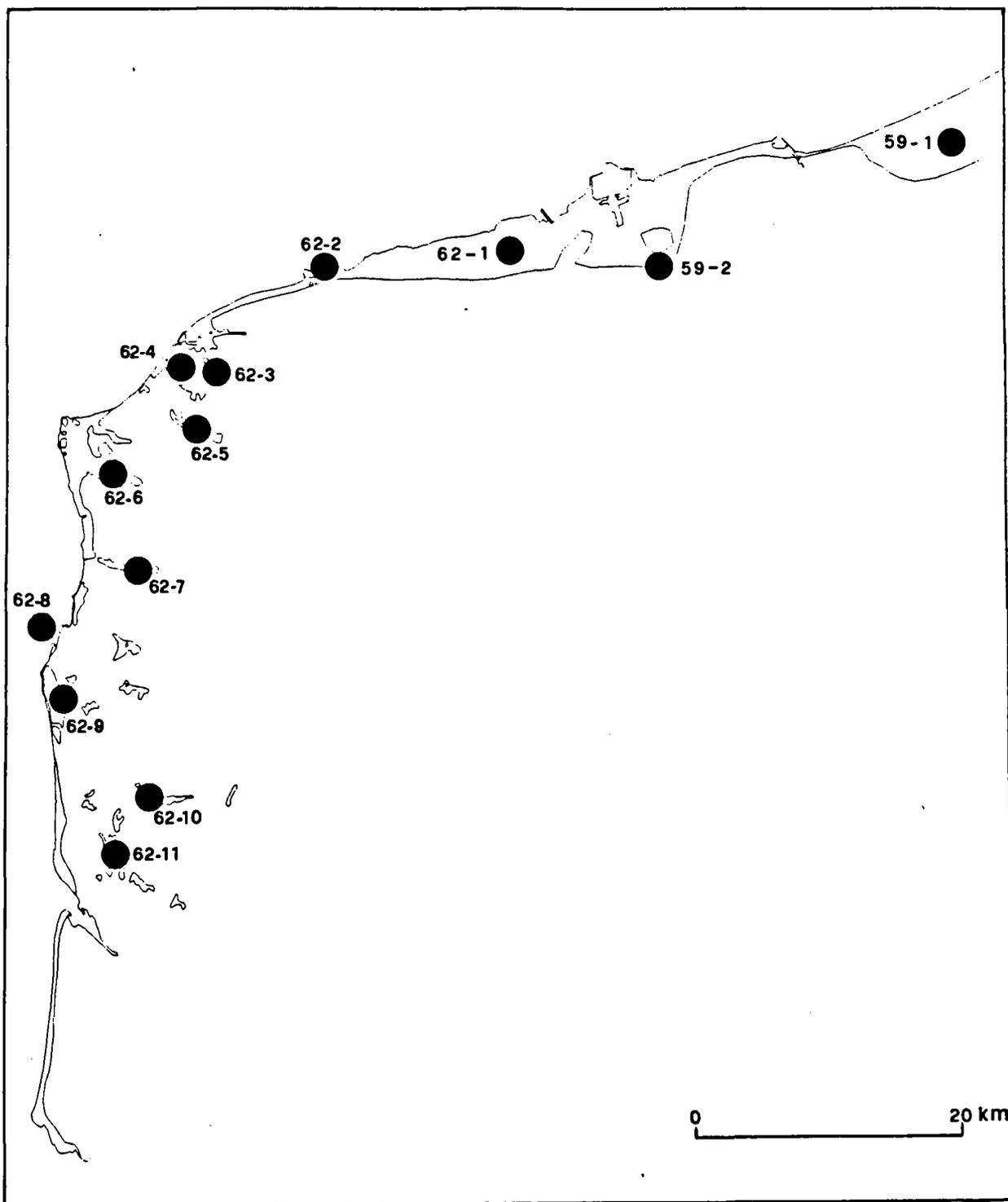
Floristique). Afin que l'intrusion visuelle et le bruit émis par les éoliennes ne soient pas trop importants pour les riverains, une distance minimale de 300 mètres a été adoptée entre les éoliennes et les habitations.

Dans le SIG du Conseil Régional, toutes les zones naturelles protégées constituent une couche d'information. Les zones naturelles protégées ont été éliminées des zones favorables par intersection de couvertures. Dans une deuxième étape, à l'aide de la couverture d'occupation du sol (32 couches), des espaces tampons de 300 mètres ont été créés autour des espaces urbanisés. A ce stade du travail, il ne reste plus que 22 secteurs représentant 62 km².

Les zones de servitudes aéronautiques, les zones de dégagement des faisceaux hertziens sont ensuite pris en compte ainsi que l'accès et la puissance du réseau électrique. Certains sites sont alors trop petits ou le réseau électrique trop faible pour que l'on puisse y réaliser un parc éolien. A la fin de cette phase, il ne reste plus que 13 sites potentiels.

Sur chacun des 13 sites, il a été adopté une configuration en ligne avec un espacement entre les éoliennes de 6 diamètres. Les parcs éoliens comporteront au moins 4 machines et auront une puissance installée supérieure à 2 MW. Deux simulations de production ont été faites avec le logiciel WASP à partir de machines de 300 et 600 kW, voir le tableau en annexe à la page 187.

Sur les 13 sites potentiels, voir la carte ci-après, il est possible d'installer entre 130 et 180 éoliennes, d'une puissance totale de 55 à 80 MW pouvant produire annuellement de 150 à 250 GWh.



Carte 9 : Zones où la vitesse du vent est supérieure à 7m/s à 30 mètres au-dessus du sol et localisation des parcs éoliens potentiels.

PISTES POUR AMELIORER L'ATLAS EOLIEN

La cartographie utilisée dans ce travail provient de la digitalisation des courbes de niveau et des limites d'agglomérations et de forêts des cartes au 1/100 000. Actuellement cette façon de faire n'est plus tolérée par l'IGN. Aussi, les prochains atlas éoliens devront utiliser des cartes numériques du commerce.

Il est possible d'améliorer la précision des cartes numériques en utilisant les données existantes provenant de différents organismes.

Ainsi, l'Institut Géographique National, IGN, vend des données cartographiques numériques. Par exemple, la "BD cartographique" comprend 9 couches d'informations :

- le réseau routier,
- le réseau ferré,
- le réseau hydrographique linéaire,
- le franchissement entre réseaux,
- le réseau électrique,
- les objets isolés,
- les unités administratives ou techniques,
- l'occupation et l'usage du sol,
- le relief ou l'orographie ("BD alti").

Les deux dernières couches présentent un intérêt pour l'évaluation du potentiel éolien à l'aide d'un outil tel que le WASP.

Les informations numériques sont chères. Par exemple, la couche d'occupation et d'usage du sol coûte environ 18 F le km² en version topologique (format EDIGEO avec les données associées) et 7 F le km² en version dessin (format DXF), soit un coût total d'environ 200 kF en version topologique ou de 90 kF en version dessin pour l'ensemble de la région Nord-Pas-de-Calais. La périodicité de la mise à jour de cette couche n'est pas encore définie par l'IGN.

La "BD alti" est un ensemble de points référencés en x, y et z (altitude). Il n'est pas possible d'obtenir directement les courbes de niveau vectorisées du fait de restrictions d'usages provenant de l'armée. Il est cependant possible de reconstituer les courbes de niveau à partir de ce semis de points à l'aide d'un logiciel, mais la précision obtenue sera moins grande. Le prix de cette couche varie selon la finesse du maillage de points et de la surface demandée. Pour couvrir l'ensemble de la région, il faut compter 170 kF pour un maillage de 50 mètres.

Un travail complémentaire de mise au format des données achetées existe, quelle que soit la provenance des données. En effet, le format des fichiers cartes utilisés dans le logiciel WAsP est un format ASCII à deux colonnes.

La "BD topo" de l'IGN est en cours de création. Elle est faite à partir d'une campagne de photogrammétrie. Elle aura la précision d'une carte d'étude au 1/5000. Il y a deux couches : la planimétrie (position exacte et forme des bâtiments) et l'altimétrie (courbe de niveau vectorisée). Dans la région Nord-Pas-de-Calais, une seule carte au 1/50 000 existe en "BD topo"; il s'agit de la carte de Bapaume. Sept autres cartes de la région minière sont en cours de réalisation; elles seront disponibles en 1995 et 1996. Aucune autre carte n'est pour l'instant programmée dans la région Nord-Pas-de-Calais.

Le prix de cette base de données est prohibitif : 2200 F le km² en version topologique et 900 F le km² en version dessin, soit un coût de 27 500 kF pour l'ensemble de la région quand celle-ci sera complètement achevée.

Son prix, ainsi qu'une couverture incomplète avant de longues années font que les données numériques de cette base ne peuvent pas être utilisées pour constituer des fichiers de cartes utilisables par le logiciel WAsP ou tout autre logiciel d'évaluation du potentiel éolien.

La Direction Générale des Impôts (DGI) gère le cadastre et a pour ambition de le faire numériser d'ici une dizaine d'années. Dans le département du Nord, deux accords ont été signés entre la Direction des Services Fiscaux (DSF), service extérieur de la DGI, et la Communauté Urbaine de Dunkerque ainsi que le Conseil Général pour numériser l'ensemble des cadastres du département du Nord. Dans le Pas-de-Calais, une politique semblable est pratiquée avec différents districts urbains, mais pour l'instant, l'ensemble du territoire départemental n'est pas concerné. Cette base numérique permettra d'obtenir les contours des parcelles boisées et, avec quelques manipulations, le contour des agglomérations. Il est donc possible de réaliser une carte de rugosité à partir du cadastre numérique. Par contre, dans le cadastre, il n'existe aucune donnée concernant le relief. Le coût des données n'est pas encore fixé.

Certains organismes, comme la Communauté Urbaine de Lille ou le District Urbain d'Arras ont fait réaliser des campagnes de photogrammétrie. Des courbes de niveau ont été établies et sont généralement disponibles sous format dessin (DXF) après autorisation de la part de la collectivité locale.

Concernant la rugosité, il est possible de traiter une ou des images satellites et de récupérer à l'aide d'un logiciel les contours des agglomérations, des forêts et des étendues d'eau.

La DEED, Direction Environnement Energie Déchets du Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais a mis en place un Système d'Information Géographique. La société SIRS a exploité l'imagerie satellitaire provenant de SPOT. Une couverture du sol en 32 classes a été réalisée. Il est donc possible, par le biais d'un accord, de récupérer les contours des agglomérations, des forêts, des surfaces en eau et de réaliser ainsi une carte de rugosité.

En 1993, nous avons effectué un traitement d'image satellite Landsat avec M. Kergomard (Laboratoire de Climatologie et d'Hydrologie de l'Université de Lille) sur le Calaisis. Une comparaison avec les données de la "BD carto" de la DEED a montré que le travail effectué était de bonne qualité et pouvait être utilisé aussi comme entrée cartographique dans le logiciel WAsP. Cependant, le temps de traitement des images est relativement long et on ne peut obtenir aucune information concernant le relief.

Comme on le voit, la réalisation des fichiers cartographiques nécessaires pour faire un atlas éolien avec un logiciel d'évaluation du potentiel éolien coûte très cher et demande beaucoup de temps.

Pour la région Nord-Pas-de-Calais, on pourrait réaliser une carte de rugosité à partir de la BD utilisation du sol de la DEED, après accord de cet organisme. Pour le relief, il n'existe pas d'autre solution que d'acheter la "BD alti" et de générer des courbes de niveau avec un logiciel.

Le WAsP est un modèle numérique, et comme tout modèle il représente plus ou moins bien la réalité, d'autant plus que pour bien le faire fonctionner, il faut fournir au modèle des cartes précises et des données météorologiques fiables, ce qui n'est pas toujours facile à faire.

Dans le cas de projet d'installation d'éoliennes, après avoir recherché les sites potentiellement intéressants avec le WAsP, il est nécessaire d'effectuer une campagne de mesures sur le site potentiel. Il faut alors mesurer la vitesse et la direction du vent à la hauteur de l'axe du rotor de l'éolienne, soit environ 30 mètres pour une machine de 300 kilowatts, mais aussi à 10 mètres pour pouvoir comparer la série de données avec celles des stations météorologiques environnantes. Il faut mesurer aussi la vitesse maximale instantanée ainsi que la turbulence du vent, car ces paramètres ont une influence sur la résistance et la durée de vie des éoliennes.

La campagne de mesures doit être suffisamment longue (de 6 mois à un an, au minimum) pour pouvoir estimer correctement la vitesse moyenne et obtenir les fréquences des vitesses de vent du site.

**LES VENTS EXTREMES
DANS LA
REGION NORD-PAS-DE-CALAIS**

LES CARACTERISTIQUES DES VENTS EXTREMES

Les tempêtes et plus particulièrement celles de Janvier et Février 1990 sont encore présentes dans nos mémoires. Elles ont une grande puissance destructrice tant pour le milieu naturel que pour les activités humaines.

Le risque de casse des éoliennes existe et il est donc intéressant d'étudier dans ce cadre l'intensité et les fréquences des vents forts et des tempêtes.

Les données de vent

Dans les feuilles de vent des TCM, MétéoFrance indique pour tous les jours du mois la vitesse maximale instantanée, la direction du vent qui lui est associée ainsi que l'heure à laquelle le phénomène est apparu.

Comme pour les données trihoraires, il y a peu de données manquantes dans les vitesses maximales quotidiennes du vent des stations synoptiques : de 0% à Lesquin à 4.6% à Boulogne (voir le tableau situé en annexe à la page 188). Par contre, le taux de données manquantes est plus élevé pour les stations automatiques : de 1 à 17%.

Pour les traitements ultérieurs de ces données, nous avons été amenés à combler les lacunes en utilisant une méthode basée sur les régressions linéaires. Nous avons comparé ensuite ces données recalculées avec les données maximales quotidiennes moyennées sur 10 minutes et les données trihoraires moyennées sur 10 minutes de la journée en question; des correctifs ont éventuellement été apportés aux données recalculées.

MétéoFrance s'est rendu compte que les données de vitesse de vent fort des stations automatiques étaient sous-estimées. Des tests sont actuellement en cours à Abbeville pour essayer de cerner et quantifier le problème. Aussi, il faudra interpréter avec précaution les données de vitesse maximale instantanée de ces stations.

Les résultats

En climatologie, on utilise deux seuils de vitesse pour les vents extrêmes : 16 m/s en vitesse instantanée, ce qui correspond à un niveau de vent fort et 28 m/s, niveau qui correspond à une tempête.

Les tableaux ci-dessous précisent le nombre de jours avec vents forts (≥ 16 m/s) et tempêtes (≥ 28 m/s), pour la période 1979-1990.

| ≥ 16 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1979-1990 |
|-----------|----|----|----|---|---|---|---|---|---|----|----|----|-----------|
| DUN | 13 | 9 | 12 | 7 | 5 | 5 | 5 | 6 | 7 | 9 | 10 | 13 | 100 |
| BOU | 15 | 10 | 13 | 7 | 5 | 6 | 5 | 7 | 9 | 12 | 12 | 16 | 116 |
| LET | 10 | 7 | 8 | 6 | 4 | 3 | 3 | 3 | 6 | 7 | 7 | 8 | 73 |
| LES | 9 | 6 | 8 | 5 | 4 | 2 | 3 | 3 | 4 | 5 | 5 | 8 | 61 |
| EPI | 9 | 6 | 9 | 5 | 4 | 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 8 | 62 |

Tableau 28 : Nombre de jours avec vent fort, supérieur ou égal à 16 m/s, 1979-1990.

| ≥ 28 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1979-1990 |
|-----------|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|----|----|----|-----------|
| DUN | 2 | 1 | 1 | | | | | | | | | 1 | 5 |
| BOU | 1 | 2 | 1 | | | | | | | 2 | 1 | 2 | 9 |
| LET | | 1 | | | | | | 0.1 | | | | | 2 |
| LES | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | 1 | 4 |
| EPI | 1 | 1 | 1 | | | | | | | | | 1 | 4 |

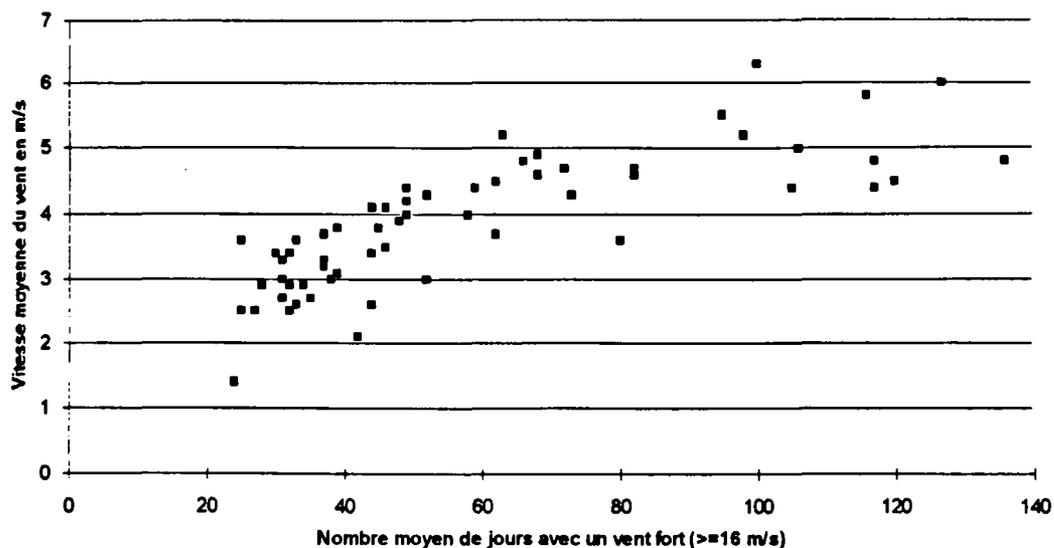
Tableau 29 : Nombre de jours avec vent violent, supérieur ou égal à 28 m/s, 1979-1990.

Les stations du littoral ont, en moyenne, 2 fois plus de jours avec vent fort (≥ 16 m/s) ou même de tempête que les stations de l'intérieur. Ces vents forts se produisent essentiellement en période froide comme le montrent les 2 tableaux ci-dessus, voir aussi les différents tableaux situés en annexe aux pages 189 à 191. C'est à Boulogne que l'on observe le plus de journées avec vent fort, près d'un jour sur trois. En effet, l'orientation géographique du littoral de la Manche, Nord-Sud, fait que les vents forts de secteur Sud-Ouest et Ouest proviennent de la mer et sont peu freinés en arrivant à Boulogne, tandis qu'à Dunkerque ces mêmes vents proviennent de l'intérieur des terres où la rugosité est plus forte. On trouvera en annexe aux pages 192 à 194, 3 cartes de la région Nord-Pas-de-Calais représentant le nombre de jours avec un vent fort.

A partir des RMT de la période 1979-1988, nous avons calculé le nombre de jours moyens avec un vent fort pour les stations météorologiques françaises présentées dans ce document qui ne présentent pas de lacunes. Une carte de France située en annexe à la page 195 montre que, comme pour les vitesses moyennes, les régions où il y a le plus de journées avec un vent fort sont les régions bordant la Mer du Nord, la Manche, l'Atlantique Nord, l'Aude et le sillon rhodanien : on observe 136 jours avec un vent fort à Perpignan, 127 à Belle-Ile, 120 à Toulon, 117 à Carcassonne et Orange, 116 à Boulogne, 106 à Marignane,

105 à Montélimar. Sur certains sommets ces valeurs peuvent être dépassées. Ainsi au Mont-Aigoual, la moyenne est de 277 sur une période de 7 ans.

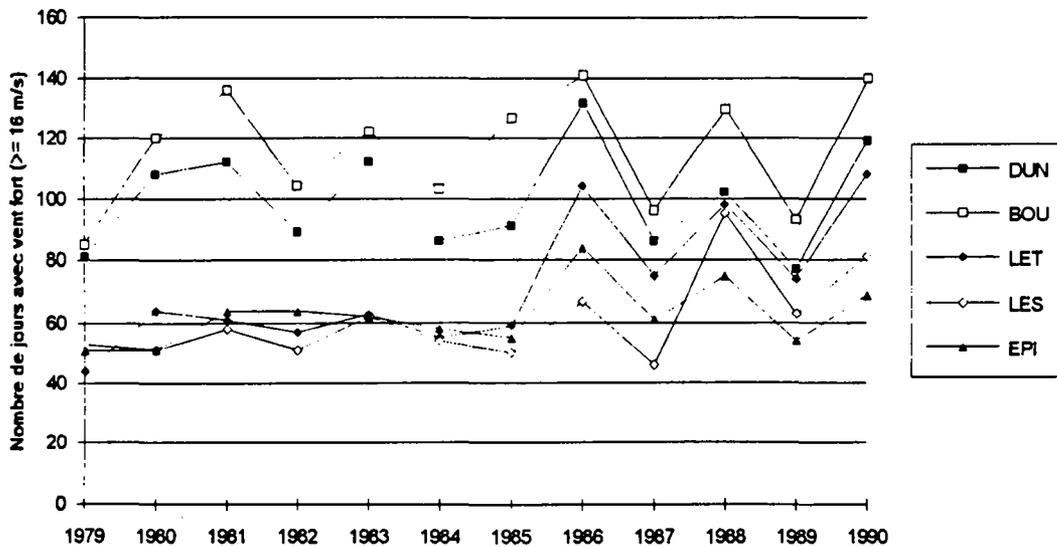
Le nombre moyen de jours avec un vent fort est corrélé avec la vitesse moyenne annuelle, comme le montre le graphique ci-dessous. Cependant, dans les régions de Mistral et de Tramontane, on observe une grande fréquence de vent fort (> 100 jours par an) bien que la vitesse moyenne soit relativement modérée (4 à 5 m/s).



Graphique 14 : Nombre moyen de jours avec un vent fort en fonction de la vitesse moyenne annuelle du vent de 61 stations françaises, 1979-1988.

Sources : RMT

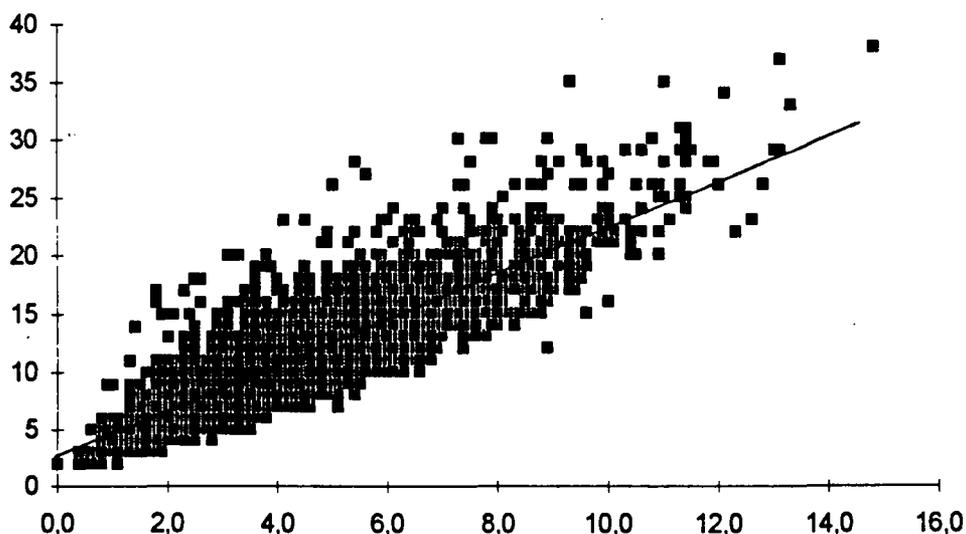
Il s'agit bien entendu de moyennes. Comme pour la vitesse moyenne du vent, le nombre de jours avec vent fort fluctue d'une année à l'autre, ainsi que le montrent les différents tableaux situés en annexe aux pages 189 à 191. Le graphique ci-après montre des variations annuelles du même type que pour les vitesses moyennes annuelles, voir le graphique à la page 83. On observe une alternance d'années avec beaucoup et peu de vents forts à partir de l'année 1985. La principale différence réside dans la plus grande variabilité de ce paramètre. En effet, le coefficient de variation est compris entre 0.16 à Epinoy et 0.29 au Touquet.



Graphique 15 : Variations annuelles du nombre de jours avec un vent fort, supérieur ou égal à 16 m/s, 1979-1990.

A l'échelle annuelle, il existe une bonne corrélation entre vitesse moyenne annuelle du vent et le nombre jours avec un vent fort uniquement pour la station de Boulogne, $r = 0.95$ (voir les graphiques situés en annexe aux pages 196 à 197). Par contre, il n'existe pas, pour la période étudiée, de bonnes corrélations entre ces deux paramètres pour les autres stations : $r = 0.73$ à Dunkerque, 0.59 au Touquet, 0.53 à Lesquin et 0.50 à Epinoy.

A une échelle encore plus fine, on remarque que la vitesse maximale quotidienne du vent est bien corrélée avec la vitesse moyenne quotidienne, comme le montre le graphique ci-après.



Graphique 16 : Vitesse maximale instantanée quotidienne du vent en fonction de la vitesse moyenne quotidienne du vent, en m/s. Lesquin 1979-1990.

Les valeurs s'organisent dans un nuage de points assez concentré autour d'une droite d'équation ajustée par la méthode des moindres carrés. La vitesse maximale quotidienne peut se déduire de la vitesse moyenne quotidienne à l'aide de l'équation, $V_{max} = 2 V_{moy} + 2.4$; le coefficient de corrélation est de 0.85.

Dans les faibles vitesses moyennes quotidiennes de vent, on observe quelques points au-dessus du nuage qui correspondent à des coups de vent accompagnant les orages.

Les vitesses maximales

Le tableau ci-dessous indique les vitesses maximales observées, en m/s, pour chacun des douze mois de l'année de la période 1979-1990.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | Max 79-90 |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----------|
| DUN | 43 | 37 | 32 | 26 | 31 | 24 | 24 | 29 | 26 | 34 | 41 | 34 | 43 |
| BOU | 43 | 40 | 32 | 27 | 28 | 27 | 27 | 31 | 34 | 46 | 38 | 39 | 46 |
| LET | 37 | 33 | 29 | 25 | 24 | 23 | 23 | 30 | 23 | 36 | 29 | 31 | 37 |
| LES | 37 | 38 | 33 | 30 | 26 | 23 | 22 | 23 | 26 | 30 | 34 | 35 | 38 |
| EPI | 34 | 37 | 30 | 34 | 24 | 29 | 26 | 24 | 27 | 32 | 37 | 31 | 37 |

Tableau 30 : Vitesse maximale instantanée du vent, en m/s, 1979-1990.

Les vitesses maximales dépassent 40 m/s sur le littoral. Toutefois, les vitesses maximales observées depuis l'ouverture des stations météorologiques n'ont pas été atteintes pendant la période étudiée, sauf pour Dunkerque.

En effet, on a enregistré 60 m/s à Boulogne en Juin 1967, 45 m/s à Lesquin en Mars 1966 et 40 m/s au Touquet en Mars 1968 et à Epinoy en Janvier 1962. Au cours de la tempête du 25 Janvier 1990, on a mesuré 43 m/s à Boulogne et Dunkerque, 42 m/s à Radinghem et de 32 à 39 m/s dans les autres stations météorologiques et automatiques du Nord de la France.

Ces vitesses maximales ont été enregistrées lors du passage de tempêtes. On peut classer les tempêtes en fonction des étendues qu'elles affectent, de leur durée et de leur probabilité d'occurrence :

- *les tempêtes cycloniques* sont organisées autour d'une zone de basse pression. Elles affectent de vastes étendues et durent plusieurs heures. On peut citer les tempêtes des 2 et 3 Janvier 1976, du 27 Novembre 1983, du 24 Novembre 1984, du 16 Octobre 1987, du 25 Janvier 1990 et du 28 Février 90;

- *les coups de vent de grain* sont des mouvements non tourbillonnaires violents qui précèdent parfois les orages;

- *les trombes* ou tornades sont des mouvements tourbillonnaires violents.

Ces deux derniers types de tempête sont très localisés spatialement et temporellement, et durent de quelques minutes à un quart d'heure.

LES TEMPETES CYCLONIQUES

Les tempêtes cycloniques, plus communément appelées tempêtes, affectent de vastes régions et durent plusieurs heures. Elles sont associées au passage d'une dépression très creusée qui engendre une variation latérale de pression importante.

Nous allons considérer comme tempête tout phénomène où la vitesse maximale instantanée dépasse 28 m/s dans les 5 stations synoptiques de la région Nord-Pas-de-Calais.

Selon cette définition, nous avons dénombré 14 tempêtes sur la période 1979-1990, soit une moyenne légèrement supérieure à une tempête par an. Elles se sont produites le 11 Décembre 1979, le 15 Décembre 1979, le 1er Février 1983, le 27 Novembre 1983, le 8 Février 1984, le 23 Novembre 1984, le 19 Janvier 1986, le 20 Octobre 1986, le 27 Mars 1987, le 16 Octobre 1987, le 22 Janvier 1988, le 25 Janvier 1990, le 26 Février 1990 et le 28 Février 1990.

La tempête du 3 Février 1990 qui a fait beaucoup de dégâts dans la Région Parisienne n'a pas été très violente dans la région Nord-Pas-de-Calais et n'est donc pas étudiée ici (*P. David, 1990*). En effet, la vitesse maximale n'a pas dépassé 31 m/s dans la région Nord-Pas-de-Calais (*F. Paul, 1991*).

Nous allons décrire ci-dessous les 2 tempêtes les plus spectaculaires. Les autres sont présentées en annexe aux pages 198 à 239.

La tempête du 16 Octobre 1987

Le 15 Octobre à 12 heures, une dépression de 970 hPa située à proximité de la Bretagne se déplace vers la Cornouailles tout en se creusant; elle atteint 955 hPa le 16 à minuit, voir le BME en annexe à la page 226. La variation latérale de pression est forte à ce moment dans la région Nord-Pas-de-Calais, 90 kilomètres; le vent souffle en tempête. La dépression se déplace et atteint les Iles Shetland vers 12 heures tout en restant à un niveau très bas, 955 hPa. Les heures suivantes, la dépression poursuit son chemin sub-méridien au large de la Norvège tout en se comblant progressivement, 975 hPa le 17 à 12 heures.

La tempête a été très violente sur la Bretagne, la Normandie, l'Ouest de la région Nord-Pas-de-Calais et le Sud de la Grande-Bretagne avec des vitesses très élevées : 61 m/s à la Pointe du Raz dans le Finistère, 60 m/s à la Pointe du Roc dans la Manche, 54 m/s à Gorleston dans le comté de Norfolk, 50 m/s au Cap de la Hève dans la Seine-Maritime, 49 m/s à Ouessant dans le Finistère, 48 m/s à Bréhat dans les Côtes-d'Armor, 47 m/s au Cap Gris-Nez, 46 m/s à Boulogne (voir la carte publiée dans la revue Weather située en annexe à la page 225). Par contre, la tempête a été beaucoup moins violente dans l'Est de la région, 34 m/s à Dunkerque, 32 m/s à Epinoy. La vitesse maximale s'est produite sur une bande de 150 kilomètres autour de la trajectoire du centre dépressionnaire. La vitesse maximale a été observée entre 10 h 20 et 15 h 30.

La tempête a été de courte durée du fait de la grande vitesse de déplacement de la dépression, environ 1000 kilomètres en 12 heures. A Dunkerque, la vitesse du vent moyennée sur 10 minutes a dépassé 15 m/s pendant 7 heures (voir à ce sujet le graphique situé en annexe à la page 225).

Selon les spécialistes anglais c'est l'une des tempêtes les plus violentes survenues dans le Sud de l'Angleterre depuis 1945 (S.D. Burt, D.A. Mansfield, 1988).

18 morts ont été recensés en Angleterre et 4 en France. L'électricité a été coupée dans le Sud-Ouest de l'Angleterre, y compris à Londres, entre 3 h et 9 h 30 du matin. Dans le Pas-de-Calais, 50 000 personnes ont été privées d'électricité pendant plusieurs heures à partir de 4 heures du matin.

Les dégâts forestiers ont été énormes en Angleterre; 3.9 millions de m³ de bois ont été détruits, soit l'équivalent de 2 ans de la production forestière de tout le Royaume-Uni (C.P. Quine, 1988). C'est la plus grande catastrophe qui a affecté la forêt anglaise depuis 1945. Les dégâts ont encore été plus importants en France : 7.5 millions de m³ de bois ont été détruits en Bretagne et en Normandie (D. Doll, 1991).

La tempête du 25 Janvier 1990

Le 24 Janvier à 12 heures, une profonde dépression de 950 hPa centrée sur l'Islande, une seconde dépression de 990 hPa, très mobile, se creusant en se déplaçant vers l'Est et des hautes pressions sur les Açores et la Russie méridionale, engendrent un flux d'Ouest et une variation latérale de pression forte sur nos régions. Le lendemain à 12 heures, la dépression mobile arrive sur l'Ecosse tout en se creusant, 955 hPa, voir le BME situé en annexe à la page 232. La variation latérale de pression est très importante et la tempête affecte une bonne partie de l'Europe. A minuit, la dépression s'est encore creusée est atteint 950 hPa dans la Mer du Nord, sa progression se ralentit et la dépression commence à se combler.

La tempête a été très forte comme l'attestent les vitesses de vent maximales observées dans le Nord-Pas-de-Calais et dans les régions limitrophes : 48 m/s au Cap Gris-Nez, 46 m/s à Koksijde, 43 m/s à Boulogne, Dunkerque et Munte, 42 m/s à Radinghem, 41 m/s à Middelkerke, 40 m/s à Abbeville, Oostende et Vron, 39 m/s à Croix-en-Ternois, Desvres, 38 m/s à Gosselies, 37 m/s à Lesquin, Le Touquet, Saulty, St-Omer et Bernaville, 35 m/s à Steenvoorde, Wancourt, 33 m/s à La Sentinelle et Epinoy et 32 m/s à Loos-en-Gohelle (voir la carte située en annexe à la page 231). La vitesse maximale a été observée entre 12 h 05 et 16 h 15. En Grande-Bretagne, la vitesse maximale a été relevée à Aberporth dans le Sud de l'Angleterre : 48 m/s à 14h et 15 h 00.

La tempête a duré longtemps du fait de la faible vitesse de déplacement de la dépression sur la Mer du Nord, environ 900 kilomètres du 25 Janvier à 12 heures au 26 Janvier à 12 heures. A Lesquin, la vitesse du vent moyennée sur 10 minutes a dépassé 15 m/s pendant 10 heures (voir le graphique situé en annexe à la page 231).

Plus de 90 personnes ont perdu la vie dans cette tempête. Ce nombre est important car les vents les plus violents se sont produits dans la journée en période d'activité humaine et aussi car la tempête a affecté un plus grand territoire qu'en Octobre 1987.

On peut essayer de présenter les principales caractéristiques des tempêtes qui ont affecté la région Nord-Pas-de-Calais par le tableau suivant :

| | Vitesse maximale dans le Nord-Pas-de-Calais | Durée de la tempête à Lesquin | Mortalité dans le Nord-Pas-de-Calais | Dégâts forestiers |
|------------------|---------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| 11 Décembre 1979 | 35 m/s | 5 heures | | |
| 15 Décembre 1979 | 39 m/s | 7 heures | | |
| 1er Février 1983 | 32 m/s | 2 heures | | |
| 27 Novembre 1983 | 45 m/s | 6 heures | | |
| 8 Février 1984 | 36 m/s | 2 heures | 0 | |
| 23 Novembre 1984 | 46 m/s | 6 heures | 1 | |
| 19 Janvier 1986 | 38 m/s | 3 heures | | |
| 20 Octobre 1986 | 35 m/s | 4 heures | | |
| 27 Mars 1987 | 37 m/s | 10 heures | 0 | |
| 16 Octobre 1987 | 47 m/s | 4 heures | 0 | 6 600 m ³ |
| 22 Janvier 1988 | 37 m/s | 3 heures | 0 | 12 800 m ³ |
| 25 Janvier 1990 | 48 m/s | 10 heures | 4 | 66 800 m ³ * |
| 26 Février 1990 | 38 m/s | 10 heures | 0 | |
| 28 Février 1990 | 40 m/s | 7 heures | 1 | |

Tableau 31 : Intensité et dégâts des principales tempêtes qui ont affecté la région Nord-Pas-de-Calais, 1979-1990.

La durée de la tempête correspond ici à la période pendant laquelle la vitesse moyenne a dépassé 15 m/s.

* : dégâts forestiers des tempêtes de Janvier et de Février 1990. Sources : ONF.

Les trajectoires des dépressions ayant engendré les tempêtes ont pu être tracées sur la carte située en annexe à la page 240. Dans 11 cas sur 12, on a observé une trajectoire Ouest-Est qui passait sur les Iles Britanniques et se dirigeait ensuite vers la Scandinavie ou l'Europe de l'Est. La trajectoire de la tempête du 16 Octobre 1987 a été sub-méridienne, Sud-Ouest Nord-Est puis Sud-Sud-Ouest Nord-Nord-Est. Dans deux autres cas, il n'y a pas eu à proprement parler de trajectoire; il s'agissait de l'extension d'une zone dépressionnaire qui entraînait des vents violents sur le Nord de la France.

LES COUPS DE VENT DE GRAIN

Les coups de vent de grain sont des mouvements non tourbillonnaires violents qui précèdent généralement les orages. Lors de la formation des orages, des mouvements ascendants d'air chaud et humide des basses couches de l'atmosphère créent des nuages épais de 10 à 15 kilomètres. Des mouvements descendants d'air froid se produisent. Dans certaines situations, ces courants descendants ainsi que les mouvements horizontaux qui résultent de son étalement brutal lorsqu'il atteint la surface peuvent être violents et occasionner des dégâts très importants (*F. Roux, 1991*), tant par la destruction due au vent, phénomène de chablis dans les forêts, toitures enlevées, que par la chute de grêle qui abîme les verrières, les véhicules, les cultures. La durée de vie de cette rafale atteint généralement quelques minutes.

Le coup de vent de grain des Vosges du 11 Juillet 1984 a provoqué plus d'un milliard de francs de dégâts dans 15 départements français (*J. Dessens, P. Blin, 1988*). Dans le seul département des Vosges, 12 000 hectares de forêts ont été sinistrés, 10 000 hectares de cultures et de pâtures ont été endommagés et 20 000 abonnés EDF ont été coupés du réseau pendant une période de 1 à 4 jours.

A Boulogne, la vitesse maximale observée depuis le démarrage de la station météorologique s'est produite lors d'un coup de vent de grain le 25 Juin 1967 (*A. Bordes, 1968*).

Dans la région Nord-Pas-de-Calais, nous avons étudié les coups de vent précédant les orages des stations de Lesquin et d'Epinoy. Sur la période 1979-1988, nous avons relevé 22 coups de vent supérieur à 16 m/s précédant les orages à Epinoy et 21 à Lesquin pour la période 1979-1986. On trouvera en annexe à la page 241 la liste des orages recensés à Lesquin et Epinoy au cours desquels on a observé une rafale de vent supérieure ou égale à 16 m/s.

| | Nombre d'orages | Nombre de coup de vent où la vitesse est supérieure ou égale à 16 m/s | Coup de vent où la vitesse est supérieure ou égale à 23 m/s | Coup de vent où la vitesse est supérieure ou égale à 28 m/s | Vitesse maximale observée avant et durant l'orage |
|---------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Lesquin | 154 | 21 (13.6%) | 2 (1.3%) | 0 (0.0%) | 23 m/s |
| Epinoy | 141 | 22 (15.6%) | 7 (5.0%) | 2 (1.4%) | 29 m/s |

Tableau 32 : Fréquence et intensité des coups de vent associés aux orages.

Dans les secteurs intérieurs de la région Nord-Pas-de-Calais, on observe, dans environ 15% des cas d'orages, une rafale avec une vitesse instantanée supérieure ou égale à 16 m/s. Sur la période étudiée, dans 2 cas seulement, la vitesse maximale a dépassé 28 m/s, soit une fréquence d'environ 1%.

Les orages sont très localisés; aussi les rafales précédant les orages le sont aussi. Le maillage des stations anémométriques de la région Nord-Pas-de-Calais n'est pas très dense, aussi il n'est guère possible d'avoir une représentation spatiale exhaustive du phénomène. L'exhaustivité impliquerait un réseau de mesures plus dense ainsi que le dépouillement de la presse quotidienne afin de retrouver les coups de vent destructeurs.

LES TROMBES

La trombe est un phénomène tourbillonnaire intense dont la présence se manifeste par une colonne nuageuse ou un cône nuageux renversé en forme d'entonnoir appelé "tuba" sortant de la base d'un Cumulo-Nimbus, et par un "buisson" constitué de goutellettes d'eau soulevées de la surface de la mer ou par des poussières, du sable ou des débris divers, soulevés du sol.

C'est le phénomène atmosphérique le plus violent; la vitesse du vent peut atteindre 500 km/heure. La zone où les dégâts apparaissent correspond à la zone du passage de la colonne nuageuse; celle-ci est heureusement assez étroite, de quelques mètres à quelques centaines de mètres. Le phénomène se déplace selon une trajectoire qui s'étend entre quelques centaines de mètres pour les trombes les moins fortes à plus de 20 kilomètres pour les trombes les plus fortes.

L'effet d'aspiration de la trombe peut soulever et déplacer des véhicules, des êtres humains, des toitures de maisons, l'eau des mares et des rivières. La trombe a aussi un effet destructif direct : les arbres peuvent être arrachés.

Les trombes ont été classées en 6 catégories par Fujita en fonction de leur intensité et du type de dégâts qu'elles occasionnent (voir à ce sujet le tableau situé en annexe à la page 242). Cette échelle est utilisée par les américains et les français. Les anglais utilisent l'échelle TORRO qui comporte 11 classes (*A. Perry, D. Reynolds, 1993*), voir le tableau situé en annexe aux pages 243-244.

Dans l'Europe du Nord-Ouest, les trombes n'atteignent pas l'intensité des tornades Nord américaines. Jusqu'en 1968, 3 travaux de recherche avaient recensé environ 160 trombes en Angleterre et au Pays-de-Galles (*D.M. Elsom, 1985*). Depuis 1974, l'organisation TORRO, TORnado and storm Research Organisation, a effectué un grand travail de recherche, de compilation de données anciennes et de surveillance des trombes. Une base de données, régulièrement mise à jour, comporte actuellement 2000 trombes ayant affecté l'Angleterre et le Pays-de-Galles. The Journal of Meteorology publie un rapport semestriel sur les trombes observées en Angleterre et au Pays-de-Galles (*M.W. Rowe, G.T. Meaden, 1993*). Au Royaume-Uni on observe, durant 10 et 14 jours par an, une trombe (*D.M. Elsom, G.T. Meaden, 1984*). Actuellement on estime à 32 le nombre de trombes qui se produisent chaque année dans le Royaume-Uni (*A. Perry, D. Reynolds, 1993*). L'année 1981 a été une année record en Angleterre et au Pays-de-Galles, puisque 152 trombes y ont été recensées, dont 105 pour la seule journée du 21 Novembre (*M. W. Rowe, G. T. Meaden, 1985*).

En France, une étude a été réalisée en 1984 pour la Délégation aux Risques Majeurs (*J. Dessens, 1984*). Il a été recensé 100 trombes entre 1680 et 1980, dont 5 dans la région Nord-Pas-de-Calais. Une actualisation de ce travail a été faite en 1989; 107 grandes trombes de classes F2 à F5, échelle de Fujita, ont été

recensées sur la période 1680-1988 (*J. Dessens, J.T. Snow, 1989*). En France, la superficie moyenne atteinte par une trombe est de 4 km², aussi la probabilité pour qu'un point donné du territoire français soit touché par une trombe importante est de $1.5 \cdot 10^{-5}$ par an, soit un temps de retour d'environ 70 000 ans (*J. Dessens, J.T. Snow, 1989*). Pour la région Nord-Pas-de-Calais, la probabilité est de $2.8 \cdot 10^{-5}$ par an, soit un risque deux fois supérieur que pour le reste du territoire. En annexe à la page 245 on trouvera la liste des trombes qui ont affecté la région Nord-Pas-de-Calais depuis le début du 19^{ème} siècle. Cette liste, non exhaustive, reprend les résultats actuels des recherches de J. Dessens ainsi que nos investigations personnelles. En effet, nous effectuons actuellement un travail de recherche sur les tornades anciennes dans la région Nord-Pas-de-Calais.

Les grandes trombes françaises se produisent surtout en période printanière et estivale; cependant, la probabilité d'avoir une trombe en hiver n'est pas nulle. La probabilité de trombe est maximale entre 16 et 19 heures. Les trombes se produisent quand il y a interaction entre une couche inférieure de l'atmosphère instable s'écoulant vers le Nord avec de l'air maritime en provenance de l'Atlantique s'écoulant vers l'Est. Le rôle primordial de la convection dans la formation des trombes est suggéré par le maximum de fréquence estivale et en fin d'après-midi. Les trombes sont généralement associées aux orages et à la grêle (*J. Dessens, J.T. Snow, 1989*).

EFFETS DES VENTS EXTREMES SUR LES EOLIENNES

Les temps de retour des vents extrêmes

Afin de connaître la valeur susceptible d'être atteinte ou dépassée, nous allons utiliser la méthode de Gumbel. Celle-ci consiste à transformer une série de points en une courbe quasi rectiligne. Des graphiques ayant pour abscisse $-\text{Log}(-\text{Log}$ de la fréquence cumulée) et en ordonnée le carré de la vitesse maximale instantanée annuelle ont été tracés, voir les annexes pages 246 à 248. L'ajustement se fait par une droite d'équation $y = ax + b$. L'ajustement est optimisé par la méthode des moindres carrés.

Les valeurs cinquantenaires et centenaires théoriques sont synthétisées dans le tableau ci-dessous :

| | Vitesse cinquantenaire | Vitesse centenaire | Période d'étude |
|------------|------------------------|--------------------|-----------------|
| Dunkerque | 46 m/s | 48 m/s | 1958-1990 |
| Boulogne | 49 m/s | 51 m/s | 1958-1990 |
| Le Touquet | 40 m/s | 41 m/s | 1956-1990 |
| Lesquin | 43 m/s | 45 m/s | 1956-1990 |
| Epinoy | 42 m/s | 44 m/s | 1956-1990 |

Tableau 33 : Estimation des vitesses maximales cinquantenaires et centenaires à 10 mètres au-dessus du sol.

Sur le littoral, la vitesse cinquantenaire est supérieure ou égale à 46 m/s, tandis qu'à l'intérieur des terres celle-ci est de 42 à 43 m/s. Ces valeurs sont conformes à ce qui est généralement calculé en Grande-Bretagne et en Allemagne. Des corrections doivent être apportées pour connaître la vitesse cinquantenaire à 30 mètres au-dessus du sol, soit la hauteur de l'axe du rotor des éoliennes de 300 kilowatts. Un facteur de correction de 1.1 est proposé pour les terrains plats et de 1.2 pour les sommets de colline (*D. Milborrow, 1994*).

A 30 mètres au-dessus du sol, les vitesses cinquantenaires seraient de : 54 m/s à Boulogne, 51 m/s à Dunkerque, 47 m/s à Lesquin, 46 m/s à Epinoy et 44 m/s au Touquet.

Les effets des tempêtes sur les éoliennes

Les règles définissant les effets de la neige et du vent (DTU Règles NV65) sur les constructions ont classé la France en 3 types de régions en fonction des vitesses extrêmes observées dans les stations météorologiques, voir la carte située en annexe à la page 249 (*Anonyme, 1990*).

Le littoral de la région Nord-Pas-de-Calais se situe dans la région II et le reste du territoire régional en zone I, région la moins exposée et nécessitant le moins de précaution. A moins de 6 kilomètres du littoral, on considère que le site est exposé; les règles NV65 préconisent un coefficient correcteur de 1.30. Les cahiers des charges des constructions, donc des éoliennes, doivent tenir compte des pressions dynamiques de base suivantes :

| | Pression Dynamique de base normale | Vent maximal | Pression Dynamique de base extrême | Vent maximal |
|--------------------------|------------------------------------|--------------|------------------------------------|--------------|
| Région I | 50 daN/m ² | 28.6 m/s | 87.5 daN/m ² | 37.8 m/s |
| Région II | 70 daN/m ² | 33.8 m/s | 122.5 daN/m ² | 44.7 m/s |
| Région II en site exposé | 91 daN/m ² | 42.8 m/s | 159.3 daN/m ² | 56.6 m/s |

Tableau 34 : Contraintes pour la construction de bâtiments.

Pour l'arrondissement de Lille il faut majorer de 10% les données de la Région I.

Les éoliennes sont généralement prévues pour résister à des vents plus violents que ceux indiqués dans les règles NV65.

Les spécialistes de l'énergie éolienne proposent de minimiser les risques de casse des éoliennes en ajoutant un facteur correctif de 1.15 aux valeurs cinquantenaires estimées à 30 mètres au-dessus du sol (*D. Milborrow, 1994*). Ainsi, dans la région Nord-Pas-de-Calais, les valeurs pour lesquelles devraient résister les éoliennes seraient les suivantes :

- 62 m/s à Boulogne,
- 68 m/s sur les sommets des collines proches de la Manche et de la Mer du Nord,
- 59 m/s à Dunkerque,
- 51 m/s au Touquet,
- 54 m/s à Lesquin,
- 53 m/s à Epinoy.

Les vendeurs d'éoliennes assurent que leurs machines résistent à des vents d'au moins 50 m/s (vitesse de survie). Celle-ci varie selon les différents constructeurs, ainsi que le montre le tableau suivant :

| Marque et pays | Puissance | Diamètre | Vitesse de survie |
|----------------|-----------|-----------|-------------------|
| Bonus (DK) | 150 KW | 23 mètres | 52 m/s |
| HMZ (B) | 300 KW | 25 mètres | 70 m/s |
| HMZ (B) | 300 KW | 28 mètres | 62 m/s |
| HMZ (B) | 750 KW | 40 mètres | 55 m/s |
| Nordtank (DK) | 300 KW | 31 mètres | 53 m/s |
| Nordtank (DK) | 450 KW | 37 mètres | 53 m/s |
| Tacke (D) | 600 KW | 43 mètres | 65 m/s |
| WEG (GB) | 300 KW | 33 mètres | 60 m/s |
| Winworld (DK) | 200 KW | 23 mètres | 56 m/s |

Tableau 35 : Vitesse de survie de différentes éoliennes.
Sources d'information : documentation des constructeurs.

Les éoliennes sont donc prévues pour résister à la plupart des tempêtes cycloniques. Par contre, certaines ne pourraient résister aux coups de vent de grain les plus violents ainsi qu'aux tornades. Pour ces deux dernières calamités, il faut remarquer que beaucoup de constructions n'y résisteraient pas non plus.

D'après un article paru dans le numéro d'Avril 1990 de "Windpower Monthly", nous pouvons constater que trois éoliennes seulement ont été détruites par la tempête du 25 Janvier 1990 sur les 3 000 machines en fonctionnement au Danemark et cinq autres ont été sérieusement endommagées. Au cours de cette même tempête, sur les 1608 éoliennes suivies par la revue Windstats, 295 seulement ont été arrêtées momentanément à cause des vents violents. Cela montre la solidité et la fiabilité élevée de la technique éolienne.

Le 8 Décembre 1993, une violente tempête a affecté le Sud-Ouest de l'Angleterre et le Pays de Galles. Des vents de 42 et 43 m/s ont été mesurés en Cornouailles et au Pays-de-Galles. 3 éoliennes de 300 kw ont été gravement endommagées dans le parc éolien de Cemmaes au Pays de Galles : perte de 2 jeux de pâles et d'un rotor. Sur ce site, la vitesse de survie des éoliennes, estimée à 60 m/s, a peut-être été dépassée (*L. Harrison, J. Massy, 1994*).

Dans le cas de projets éoliens, il ne faut donc pas négliger l'étude des vitesses extrêmes et choisir avec une marge de sécurité suffisante les éoliennes qui vont être utilisées.

CONCLUSIONS

Le réseau de mesures du vent de la région Nord-Pas-de-Calais est assez dense, 14 points de mesures, du fait de la grande concentration des activités humaines et donc des besoins qui en résultent (navigation aérienne et portuaire), mais aussi de la grande variété des régions naturelles. Cependant, un bon nombre des pylônes anémométriques récents sont implantés dans des zones perturbées par des obstacles. Les données qui y sont faites ne sont pas toujours exploitables, d'autant plus qu'elles comportent parfois trop de lacunes.

Le développement du réseau de mesures anémométriques de MétéoFrance doit se poursuivre afin de combler les vides dans la région. Ainsi, il serait nécessaire de mesurer le vent dans l'Avesnois, dans la Plaine de la Lys mais aussi dans la Plaine Maritime à une distance de 5 à 10 kilomètres du bord de la mer afin d'estimer la décroissance de la vitesse du vent à partir de la mer. Une attention particulière doit être accordée à l'implantation des pylônes anémométriques, une implantation sur les aérodromes serait ainsi préférable.

Plusieurs générations d'appareils de mesures se sont succédées sur les 5 sites les plus anciens. Les pylônes ont été changés au moins une fois depuis l'ouverture de la station météorologique. Il est donc difficile d'avoir des séries de données effectuées dans les mêmes conditions sur une longue période. C'est pourquoi, le choix de la période d'étude ne porte que sur 12 ans, 1979-1990.

Des tests ont montré que les données d'Epinoy n'étaient pas homogènes. Une analyse multi-critères basée sur la qualité de l'implantation de l'anémomètre, le taux de données manquantes et le test de Student montre que les stations de Dunkerque, Lesquin, Boulogne, Saulty, Wancourt et Radinghem ont des données anémométriques de bonne qualité, ce qui n'est pas le cas des stations d'Epinoy, Le Touquet, Loos-en-Gohelle, St-Omer, La Sentinelle, Steenvoorde, Croix-en-Ternois et Desvres.

La vitesse moyenne du vent atteint 6 m/s sur le littoral à Dunkerque et au Cap Gris-Nez et décroît vers l'intérieur des terres, 4.4 m/s à Lesquin. Dans la majeure partie de la région, la vitesse moyenne est comprise entre 4 et 5 m/s. Du fait de l'augmentation de la rugosité, la vitesse moyenne du vent est inférieure à 4 m/s dans l'Avesnois. Le Nord-Pas-de-Calais est une des régions françaises où la vitesse moyenne du vent est la plus importante.

Les directions dominantes des vents sont le Sud, le Sud-Ouest et l'Ouest. Les secteurs Nord et Nord-Est sont des directions dominantes secondaires. Par contre, les vents des secteurs Est, Sud-Est et Nord-Ouest sont beaucoup moins fréquents. Les brises de mer, plus ou moins perpendiculaires au trait de côte, expliquent l'allure différente des roses des vents de Dunkerque, de Boulogne et du Touquet. A La Sentinelle et à Wancourt, les roses des vents des années 1989 et 1990 apparaissent aberrantes et aucune explication satisfaisante n'a été trouvée à la sur-représentation des vents du Sud à La Sentinelle et de Nord-Est à Wancourt. Les vents de Sud-Ouest sont toujours présents tout au long de l'année,

tandis que les vents des secteurs Nord, Nord-Est et Est sont plus fréquents en hiver et au début du printemps.

L'étude des types de temps qui affectent la région explique à la fois l'allure générale des roses des vents et la vitesse du vent. La fréquence élevée des temps perturbés, 62 %, due au passage fréquent des dépressions sur les Iles Britanniques, explique la prédominance des vents de secteur Sud-Ouest et Ouest dans la région Nord-Pas-de-Calais mais aussi l'importance de la vitesse moyenne. Cette dernière, en rapport avec la variation latérale de pression, est plus forte durant les types de temps perturbés. La plus grande fréquence des temps perturbés durant la saison froide explique aussi le caractère venteux hivernal de la région Nord-Pas-de-Calais.

La vitesse moyenne du vent fluctue d'une année à l'autre mais cette variabilité est beaucoup plus faible que pour les autres paramètres météorologiques. Depuis l'ouverture de la station météorologique de Lesquin en 1944, l'écart entre la valeur annuelle extrême et la valeur moyenne n'a pas dépassé 0.7 m/s, soit une variation maximale de 20 % autour de la valeur moyenne.

L'hiver est généralement la saison la plus venteuse, suivi du printemps et de l'automne, tandis que l'été est la saison la plus calme. C'est donc un régime moyen *HPAE* qui prédomine dans la région Nord-Pas-de-Calais, comme d'ailleurs sur la moitié Nord-Ouest du pays. La vitesse moyenne du vent surtout importante durant la saison froide semble donc complémentaire à l'insolation, surtout présente à la fin du printemps et en été. La variation diurne de la vitesse du vent est liée à celle de la température; elle présente un maximum au début de l'après-midi et un minimum au début de la journée. Celle-ci est plus marquée à l'intérieur des terres que sur le littoral, car le contraste thermique y est plus fort. A l'échelle journalière, la variation de la vitesse du vent et de la nébulosité montre la complémentarité de l'énergie du vent et du soleil.

La région Nord-Pas-de-Calais possède un potentiel éolien suffisant qui mérite d'être exploité. Le logiciel *WASP* a permis d'estimer dans une large mesure la ressource éolienne régionale et de localiser les zones les plus favorables pour l'utilisation de l'énergie éolienne.

Les meilleurs sites de la région, du point de vue anémométrique, sont le littoral de la Manche et de la Mer du Nord ainsi que les collines proches de la Manche, c'est-à-dire du Sud au Nord, les Monts de Dannes, St-Frieux, Violette, d'Herquelingue, Lambert, les hauteurs de Wimille, les monts de la Louve, de Couple, de Sombre, d'Hubert. Sur tous ces sites, la vitesse moyenne du vent dépasse 7 m/s à 30 mètres au-dessus du sol, seuil de rentabilité pour les industriels de l'énergie éolienne.

Dans les conditions économiques actuelles et en tenant compte des contraintes humaines et environnementales, il serait possible d'installer dans la région Nord-Pas-de-Calais 60 MW éolien dans des parcs éoliens.

L'amélioration des logiciels de calcul du potentiel éolien, notamment le WASP, devrait dans un délai assez bref permettre d'augmenter la taille des fichiers cartes. Cela permettra d'ajouter des courbes de niveaux, d'augmenter la précision des cartes et surtout d'avoir des cartes numériques beaucoup plus vastes. Cette amélioration de la cartographie rendue possible par l'augmentation des capacités du logiciel nécessite l'achat de données cartographiques numériques.

Les bases de données cartographiques de l'IGN nécessaires au bon fonctionnement des logiciels de détermination du potentiel éolien ne sont pas encore terminées, notamment en ce qui concerne les courbes de niveaux sous forme vectorisée. De plus, cette cartographie numérique est très chère. L'utilisation des cartes existantes issues du traitement de clichés satellitaires devrait permettre d'obtenir à un coût modéré une carte de rugosité. En ce qui concerne les courbes de niveaux, certaines collectivités locales ont fait procéder à des campagnes de photogrammétrie et disposent donc de courbes de niveaux vectorisées. Malheureusement, la couverture régionale est loin d'être achevée.

Le développement de campagnes de mesures d'au moins 6 mois préalables à l'installation d'éoliennes est nécessaire afin d'évaluer plus finement le potentiel éolien du site retenu.

L'évaluation du gisement éolien maritime régional devrait commencer d'ici quelques années au fur et à mesure que les balises de l'IFREMER seront implantées. Même si actuellement les coûts sont supérieurs en mer, cet important gisement "offshore" sera sans doute exploité avec profit d'ici une dizaine d'années.

Un autre trait climatologique de la région du Nord est la grande fréquence des vents forts, 60 jours par an dans l'intérieur des terres et de 100 à 120 sur le littoral. Les vitesses maximales observées depuis 1945 dépasse 40 m/s dans les 5 stations synoptiques régionales. La vitesse centenaire estimée est de 44-45 m/s à Lesquin et Epinoy, 48 et 51 m/s à Dunkerque et Boulogne. 14 tempêtes ont été recensées dans le Nord de la France sur la période de 12 ans; celles-ci se sont produites surtout pendant la période froide entre Octobre et Mars. Elles sont généralement consécutives au passage d'une forte dépression sur les Iles Britanniques. Les coups de vent de grain violents sont un peu plus fréquents, en moyenne 2 par an à l'intérieur des terres. Ceux-ci sont parfois très violents, comme celui qui s'est produit à Boulogne le 25 Juin 1967. Les trombes sont rares en France; cependant la probabilité d'occurrence est 2 fois plus élevée dans le Nord-Pas-de-Calais qu'ailleurs dans le pays. La plupart des éoliennes résisteraient aux tempêtes; par contre, certaines seraient détruites lors du passage des trombes les plus fortes ainsi que lors des coups de vent de grain les plus

violents. L'étude des vitesses extrêmes ne doit donc pas être négligée dans l'élaboration des projets éoliens.

BIBLIOGRAPHIE

J. Alexandre, M. Erpicum, C. Vernemmen.- Le climat in, Géographie de la Belgique.- Bruxelles, Crédit Communal, 1992. pp. 88-128.

Anonyme.- Règles définissant les effets de la neige et du vent sur les constructions.- Paris, Eyrolles, 1990. 214 p.

R. Arlery, H. Grisolle, B. Guilmet.- Climatologie, méthodes et pratiques.- Paris, Gauthier-Villars, 1973. 429 p.

S.M. Barton, R.S. Hunter.- A practical comparison of various resource prediction techniques in, Proceedings of an international conference held at Herning Congress Centre, Denmark 6-10 June 1988.- Bruxelles, CEE, 1988. pp. 115-123.

P. Biays et collaborateurs.- Esquisse climatologique du Nord de la France.- Lille, Association de documentation et d'études régionales, 1968. 201 p. + annexes.

A. Bordes.- Trombes et phénomènes exceptionnels des 23, 24 et 25 juin 1967 sur le Nord de la France. *La Météorologie*, 1968, pp. 373-398.

S.D. Burt, D.A. Mansfield.- The great storm of 15-16 October 1987. *Weather*, pp. 90-108.

J.-P. Ceron.- L'énergie éolienne et les mesures de vent moyen.- Notice technique du Service Métropolitain, n°14 nouvelle série.- SL, Météorologie Nationale, 1981. 29 p.

Climat-Energie-Environnement.- Recensement des sites et usages potentiels de l'énergie éolienne dans le Nord-Pas-de-Calais. Etude réalisée pour l'ADEME et le Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais. 1992. 39 p.

N.J. Cook.- The designer's guide to wind loading of building structures.- Watford, BRE, 1985. 371 p.

Y. Cordier.- Le climat de la région de Lille.- Lille, Université de Lille, 1965. 63 p.

J. Darchen, A. de Block.- Le vent sur les côtes de la France métropolitaine : Mer du Nord - Manche - Atlantique. Monographies de la Météorologie Nationale, N° 62, fascicule 1.- Paris, Météorologie Nationale, 1968. 161 p.

P. David.- Les épisodes de vents forts de janvier et février 1990 sur le nord de la France. Paris, MétéoFrance, 1990. 14 p.

D. Delaunay, P. Duchêne-Marullaz.- Caractérisation du vent sur le site d'essais de Lannion à partir des mesures in-situ.- SL, CSTB, 1984. 25 p.

- D. Delaunay.- Cartographie des caractéristiques du vent en Martinique et en Guadeloupe.- Nantes, CSTB, 1986. 60 p.
- G. De Moor.- Les théories de la turbulence dans la couche limite atmosphérique.- Boulogne-Billancourt, Direction de la Météorologie Nationale, octobre 1983. 312 p.
- J. Dessens.- Les trombes en France, climatologie et caractéristiques physiques. Neuilly-sur-Seine, Délégation aux Risques Majeurs, 1984. 31 p.
- J. Dessens, P. Blin.- Coups de vent de grain et trombes : étude comparative sur deux cas récents. *La Météorologie*, 7ème série, n°23, Juin-Août 1988, pp. 4-18.
- J. Dessens, J.T. Snow.- Les trombes en France.- SL, SN, 1989. 24 p.
- M.M. Dewailly.- L'automne dans le Nord de la France, 1961-1975.- Villeneuve-d'Ascq, Institut de Géographie, 1979. 101 p.
- D. Doll.- Les cataclysmes éoliens dans les forêts d'Europe : aperçu historique. *Forêt-entreprise*, n° 77, 5/1991, pp.8-9.
- P. Duchêne-Marullaz.- Distributions statistiques et cartographie des vitesses moyennes de vent en France. Applications à l'énergie éolienne.- Nantes, CSTB, 1977. 36 p.
- P. Duchêne-Marullaz, C. Sacre.- Guide d'implantation des petites éoliennes.- Nantes, CSTB, 1984. 119 p.
- P. Duchêne-Marullaz, C. Sacre.- Traitement statistique des données de vent pour la détermination de l'énergie produite par les systèmes éoliens.- Nantes, CSTB, SD. 25 p.
- C. Duplessis-Kergomard.- Quelques caractères de la neige dans le Boulonnais. *Cahiers de Géographie Physique* n°2, 1974 pp. 20-38.
- C. Duplessis-Kergomard.- La neige dans l'ouest de la région du Nord.- Villeneuve-d'Ascq, USTL, UER de Géographie, 1973. 152 p.
- EDF.- Notice explicative de demande d'autorisation de rejets radioactifs gazeux des tranches 5 et 6 de la centrale nucléaire de Gravelines.
- EED.- Etude du potentiel éolien de la région Nord-Pas-de-Calais. Etude financée par l'ADEME Nord-Pas-de-Calais et le Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais. Lille, EED, 1994. 69 p.
- D.M. Elsom.- Tornadoes in Britain : where, when and how often. *The Journal of Meteorology*, vol. 10, n° 100, July/August 1985, pp. 203-211.

D.M. Elsom, G.T. Meaden.- Spatial and temporal distributions of tornadoes in the United Kingdom 1960-1982. *Weather*, October 1984, pp. 317-322.

M. Erpicum.- La topoclimatologie, un outil au service de l'agronomie. Exemples pris en Belgique. *Bulletin de la Recherche Agronomique de Gembloux*, 1991, n°26, pp. 91-111.

R. Fabry.- Potentiel de l'énergie éolienne en Belgique, réglementation et mesures de soutien, in Syllabus - journée d'étude : "Perspectives de l'énergie éolienne dans les pays du Benelux".- Bruxelles, Union Economique Benelux, 1983. pp. 64-101.

P. Flatres.- Atlas et géographie du Nord et de la Picardie.- Flammarion, Paris, 1980.

S. Frandsen, E.L. Petersen.- The importance of a good wind year to start on when building a wind farm in, Proceedings of an international conference held at Travemünde, Germany 8-12 March 1993. pp. 47-49

A. Gamblin.- Le Nord-Pas-de-Calais.- SAEP, Colmar, 1984. 96 p.

H. Gland, J. Meynard.- Comparaison entre les mesures du pylône météorologique de Gravelines et celles de la station de Dunkerque.- EDF, juin 1979.

Groupe Chadule.- Initiation aux méthodes statistiques en géographie.- Paris, Masson, 1974. 187 p.

M.H. Guda.- The Curaçao wind resource assessment project in, Proceedings of KODELA wind energy conference, Curaçao 3-4 March 1994. 18 p.

L. Harrison, J. Massy.- Storm its toll on turbines; *Windpower Monthly*, Vol. 10, N° 1, January 1994, p.14.

C.G. Justus.- Vent et performances des éoliennes.- Paris, SCM, 1980. 144 p.

J. Kessler, A. Chambraud.- La météo de la France, tous les climats localité par localité.- Paris, J.C. Lattès, 1986. 312 p.

K. Kouame.- Circulation atmosphérique et anomalies climatiques urbaines. Exemple de l'agglomération lilloise.- Villeneuve-d'Ascq, USTL, 1983.

H.H. Lamb.- British isles weather types and a register of the daily sequence of circulation patterns, 1861-1971. *Geophysical Memoirs*, n°116, 1972.

L.M. Malet.- Le vent dans les premières centaines de mètres de l'atmosphère.- Bruxelles, IRM, 1989. 50 p.

G.T. Meaden.- TORRO, the tornado and storm research organisation. *The Journal of Meteorology*, vol.10, n°100, July/August 1985, pp. 182-185.

D. Milborrow.- Grappling with gusts. *Windpower Monthly*, Vol. 10, n° 2, 1994, pp. 33-38.

Ministère des Transports, Direction de la Météorologie.- Normales climatologiques 1951-1980, fascicule 1, températures. SL, Météorologie Nationale, novembre 1983. 431 p.

Ministère des Transports, Direction de la Météorologie.- Carte des précipitations en France.- SL, Météorologie Nationale, 1988.

Ministère des Transports, Direction de la Météorologie.- Normales climatologiques 1951-1980, fascicule 2, tome 2, précipitations. SL, Météorologie Nationale, Juillet 1986.

N. G. Mortensen, L. Landberg, I. Troen, E. L. Petersen.- Wind Atlas Analysis and Application Program (WAsP), Vol. 2 : User's Guide. Roskilde, Risø National Laboratory, 1993. 126 p.

G. Oualid, P. Grégoire, J. Boulet, J.-P. Jacob, J.-C. Ordonaud, C. Piallot, L. Sivil.- Comparaison OMM d'anémomètres au Mont Aigoual. *La Météorologie*, 8^e série, n° 5, Mars 1994, pp. 8-18.

T. Pahlken, G.J. Gerdes, A. Keuper.- Assessment of wind potential and area available for wind farms at the lower saxonian coast in, Proceedings of an international conference held at Travemünde, Germany 8-12 March 1993. pp. 615-618.

J.P. Palutikof, X. Guo, J.A. Halliday.- Climate variability and the U.K. wind resource in, Proceedings of an international conference held at Amsterdam 1991. pp. 342-346.

F. Paul, G. Petit-Renaud.- Présentation du gisement éolien de la région Nord-Pas-de-Calais - Rapport préliminaire.- Etude réalisée pour la délégation régionale Nord-Pas-de-Calais de l'AFME et le Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais.- Villeneuve-d'Ascq, USTL, UER de Géographie, Février 1984. 110 p.

F. Paul, G. Petit-Renaud.- Le potentiel éolien de la région Nord-Pas-de-Calais.- Etude réalisée pour la délégation régionale Nord-Pas-de-Calais de l'AFME et le Conseil Régional Nord-Pas-de-Calais.- Villeneuve-d'Ascq, USTL, Laboratoire de Climatologie et d'Hydrologie, Juin 1991. 65 p., annexes, atlas.

F. Paul.- Les tempêtes des mois de janvier et février 1990 dans le Nord de la France. *Hommes et Terres du Nord*, 1991/4, pp. 208-212.

F. Paul, C. Petit.- Geographical Information Systems (GIS) for wind parks location in the north of France. Article en cours de publication pour la conférence internationale de Thessalonique, 11-14 Octobre 1994.

A. Perlat, M. Petit.- Mesures en météorologie.- Paris, Gauthier-Villars, 1961.

A. Perry, D. Reynolds.- Tornadoes : the most violent of all atmospheric phenomena. *Geography*, n° 339, Vol. 78 Part 2, April 1993, pp. 174-178.

Person, M. Zaidineraite.- Pylône météorologique de Gravelines, exploitation statistique des mesures de juillet 1976 à avril 1980.- SL, EDF, Octobre 1980.

E. Petersen, B. Tammelin.- Wind resources assessment in complex terrain in the far north in, Proceedings of Boreas held at Hetta, Finland 10-13 february 1992.- Helsinki, NEMO, 1992. pp. 73-87.

E.L. Petersen, I. Troen, S.Hedegaard.- Windatlas for Denmark.- Roskilde, Risoe National Laboratory, 1981. 229 p.

E. Petersen, I. Troen.- European Wind Atlas.- Bruxelles, CEE, 1988. 656 p.

E. Petersen, I. Troen, N. Mortensen.- The european wind energy resources in, Proceedings of an international conference held at Herning Congress Centre, Denmark 6-10 june 1988.- Bruxelles, CEE, 1988. pp. 103-109.

G. Petit-Renaud.- Les principaux aspects du climat de la région lilloise. *Hommes et Terres du Nord*, 1973-1, pp. 103-130.

G. Petit-Renaud.- Brouillard et brume dans le Nord de la France. *Cahiers de Géographie Physique* n°2, 1974 pp. 109-159.

G. Petit-Renaud.- Aspects caractéristiques et évolution du climat dans le Nord de la France.- USTL, UER de géographie, 1974, thèse de 3ème cycle. 198 p.

G. Petit-Renaud.- Le climat in, Le Nord-Pas-de-Calais au seuil des années 80.- Lille, CRDP, 1979. pp. 61-94.

C.P. Quine.- Damage to trees and woodlands in the storm of 15-16 October 1987. *Weather*, pp. 114-118.

C.F. Ratto and coll. .- Wind field numerical simulations : a new user-friendly code in, Proceedings of an international conference held at Madrid, Spain, september 1990.- Bruxelles, CEE, 1990.

C.F. Ratto and coll. .- Identification of wind and solar sites in Liguria in, Proceedings of an international conference held at Madrid, Spain, september 1990.- Bruxelles, CEE, 1990.

F. Roux.- les orages.- Paris, Payot, 1991. 354 p.

M. W. Rowe, G.T. Meaden.- Britain's greatest tornado outbreak. *Weather*, August 1985, pp. 230-235.

M. W. Rowe, G.T. Meaden.- TORRO tornado division report : August to December 1992. *The Journal of Meteorology*, vol.18, n°180, July/August 1993, pp. 214-217.

Saint-Just (de).- Trombe dans le Pas-de-Calais. *La Météorologie*, tome IX, 1933, pp. 79-80.

Schleswag AG.- 10 Jahre Hybridkraftwerk Pellworm. *Wind Kraft Journal*, 1. Quartal 1994, pp. 6-8.

J.P. Triplet, G. Roche.- Météorologie générale.- SL, Météorologie Nationale, 1971. 317 p.

I. Troen, E. Petersen.- Siting of wind turbines in, Proceedings of an international conference held at Herning Congress Centre, Denmark 6-10 June 1988.- Bruxelles, CEE, 1988. pp. 124-134.

I. Troen, E. Petersen.- Atlas éolien européen.- Bruxelles, CCE, 1991.- 278 p.

F. Vivona.- News from Italy. *Windirections*, Volume IX, n°3, Winter 1989/90, p. 28.

Windpower Monthly.- Day of the storm - few disasters and tons of pollution prevented. *Windpower Monthly*, Vol. 6, n° 4, 1990, pp. 22-23.

J. Wolf, M. Billon, M. Morel.- Résultats d'une étude météorologique du site du C.N.E.E.L.- Lannion, C.N.E.E.L., 1984. 25 p.

R. Zubiaur, F. Martin.- Performance and limitations of wind simulation models in NW of Spain in, Proceedings of an international conference held at Travemünde, Germany 8-12 March 1993. pp. 686-688.

Zurcher, Margollé.- Trombes et cyclones.- Paris, Hachette, 1876.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Qualité des emplacements anémométriques de la région Nord-Pas-de-Calais.

Tableau 2 : Chronologie des différents types d'anémomètres utilisés dans les stations synoptiques de la région Nord-Pas-de-Calais

Tableau 3 : Taux de données manquantes des vitesses et des directions de vent en %. 1979-1990.

Tableaux 4 et 5 : Qualité de l'information anémométrique

Tableau 6 : Vitesse moyenne du vent, en m/s.

Tableau 7 : Ajustement de la distribution des vitesses de vent par la loi de Weibull. Optimisation de l'ajustement obtenu par la méthode des moindres carrés sur les vents supérieurs à 6 m/s.

Tableau 8 : Vitesse moyenne estimée du vent dans la région Nord-Pas-de-Calais, en m/s.

Tableau 9 : Campagnes de mesures de vent effectuées par Espace Eolien Développement.

Tableau 10 : Valeurs du coefficient α et type de rugosité du site.

Tableau 11 : Qualité de l'information tirée de l'étude des directions de vent.

Tableau 12 : Fréquence et vitesse moyenne des différents types de temps dans la région Nord-Pas-de-Calais.

Tableau 13 : Fréquence des différents types de temps dans la région parisienne et dans la région Nord-Pas-de-Calais.

Tableau 14 : Paramètres influençant les mesures de la vitesse du vent à Lesquin depuis l'ouverture de la station météorologique.

Tableau 15 : Vitesse moyenne du vent en fonction du tarif 2 postes d'EDF.

Tableau 16 : Production de la centrale hybride de Pellworm en 1993.

Tableau 17 : Variations diurnes de la vitesse du vent à Boulogne, en m/s, 1979-1990.

Tableau 18 : Estimation de la vitesse moyenne du vent à la colline de Pyhätunturi, données de 1990-1991.

Tableau 19 : Longueurs de rugosité adoptées dans l'atlas éolien régional Nord-Pas-de-Calais.

Tableau 20 : Qualité des points de mesure du vent dans les stations synoptiques.

Tableau 21 : Qualité des points de mesure du vent dans les stations automatiques.

Tableau 22 : Comparaison des valeurs de A et de Vm à 10 mètres au-dessus du sol. 1979-1990.

Tableau 23 : Nombre de points pour chaque classe de vitesse de vent à 10 mètres au-dessus du sol à partir des données de Lesquin et de Boulogne.

Tableau 24 : Valeurs de A, k et Vm de Boulogne calculées (WAsP) à partir des données de différentes stations météorologiques. 1979-1990.

Tableau 25 : Valeurs de A, k et Vm de Dunkerque calculées (WAsP) à partir des données de différentes stations météorologiques. 1979-1990.

Tableau 26 : Valeurs de A, k et Vm de Lesquin calculées (WAsP) à partir des données de différentes stations météorologiques. 1979-1990.

Tableau 27 : Comparaisons entre WAsP et valeurs mesurées ou estimées par EED à 10 mètres de hauteur.

Tableau 28 : Nombre de jours avec vent fort, supérieur ou égal à 16 m/s, 1979-1990.

Tableau 29 : Nombre de jours avec vent violent, supérieur ou égal à 28 m/s, 1979-1990.

Tableau 30 : Vitesse maximale instantanée du vent, en m/s, 1979-1990.

Tableau 31 : Intensité et dégâts des principales tempêtes qui ont affecté la région Nord-Pas-de-Calais, 1979-1990.

Tableau 32 : Fréquence et intensité des coups de vent associés aux orages.

Tableau 33 : Estimation des vitesses maximales cinquantenaires et centenaires à 10 mètres au-dessus du sol.

Tableau 34 : Contraintes pour la construction de bâtiments.

Tableau 35 : Vitesse de survie de différentes éoliennes.

TABLE DES GRAPHIQUES

Graphique 1 : Distribution des vitesses de vent de la station de Lesquin, 1979-1990, et ajustement par la loi de Weibull : $A = 5.2$, $k = 1.7$.

Graphique 2 : Vitesse moyenne du vent en fonction de la variation latérale de pression à Lesquin en 1984.

Graphique 3 : Variations de la vitesse moyenne annuelle, en m/s.

Graphique 4 : Variation des vitesses annuelles de Lesquin et d'Épinoxy entre 1970 et 1990.

Graphique 5 : Variations de la vitesse moyenne annuelle à Lesquin, en m/s.

Graphique 6 : Vitesse moyenne saisonnière, en m/s.

Graphique 7 : Variations mensuelles de la vitesse du vent, en m/s, 1979-1990.

Graphique 8 : Complémentarité de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne à Lesquin, 1979-1990

Graphique 9 : Variations diurnes de la vitesse du vent, 1979-1990, en m/s

Graphique 10 : Vitesse moyenne du vent en m/s à Lesquin, pour la période 1979-1990, en fonction de l'heure et du mois.

Graphique 11 : Nébulosité à Lesquin en octas, pour la période 1979-1990 en fonction de l'heure et du mois.

Graphique 12 : Variations relatives annuelles de la vitesse du vent et de la production d'électricité d'une éolienne de 300 kW au Canal des Dunes (Dunkerque).

Graphique 13 : Variations relatives mensuelles de la vitesse du vent et de la production d'électricité d'une éolienne de 300 kW au Canal des Dunes (Dunkerque).

Graphique 14 : Nombre moyen de jours avec un vent fort en fonction de la vitesse moyenne annuelle du vent de 61 stations françaises, 1979-1988.

Graphique 15 : Variations annuelles du nombre de jours avec un vent fort, supérieur ou égal à 16 m/s, 1979-1990.

Graphique 16 : Vitesse maximale instantanée quotidienne du vent en fonction de la vitesse moyenne quotidienne du vent, en m/s. Lesquin 1979-1990.

TABLE DES CARTES

Carte 1 : Localisation des stations météorologiques et automatiques

Carte 2 : Vitesse moyenne du vent dans la région Nord-Pas-de-Calais à 10 mètres au-dessus du sol, en m/s, pour la période 1979-1990.

Carte 3 : Vitesse moyenne du vent en m/s, 1979-1988.

Carte 4 : Roses des vents des stations synoptiques de la région Nord-Pas-de-Calais, pour la période, 1979-1990.

Carte 5 : Régimes saisonniers du vent dans les stations françaises, 1979-1988.

Carte 6 : Vitesse moyenne du vent à 10 mètres dans la région Nord-Pas-de-Calais, 1979-1990.

Carte 7 : Vitesse moyenne du vent à 30 mètres dans la région Nord-Pas-de-Calais, 1979-1990.

Carte 8 : Densité de puissance du vent à 30 mètres dans la région Nord-Pas-de-Calais, 1979-1990.

Carte 9 : Zones où la vitesse du vent est supérieure à 7m/s à 30 mètres au-dessus du sol et localisation des parcs éoliens potentiels.

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Modèle d'analyse du programme WAsP.

Figure 2 : Modèle d'application du programme WAsP.