

Département des Géosciences - Unité de Géographie  
Université de Fribourg (Suisse)

L'Ambroisie :  
Analyse Statistique et Modélisation Numérique de  
sa Trajectoire Aérobiologique

THESE

présentée à la Faculté des Sciences de l'Université de Fribourg (Suisse)  
pour l'obtention du grade de *Doctor rerum naturalium*

Joëlle GOYETTE-PERNOT

de France

*Thèse n° 1530*  
*Multiprint, Fribourg, 2006*

Acceptée par la Faculté des Sciences de l'Université de Fribourg (Suisse)  
sur la proposition de :

Professeur Martin Beniston, Université de Fribourg (Suisse)  
Directeur de thèse

Professeur Jean-Pierre Blanchet, Université du Québec à Montréal (Canada)  
Expert

Professeur Antoine Guisan, Université de Lausanne (Suisse)  
Expert

Professeur André Strasser, Université de Fribourg (Suisse)  
Président du jury

*Fribourg, le 14 juillet 2006*

Le Directeur de thèse :

Le Doyen :

Professeur Martin Beniston

Professeur Marco Celio

*A la mémoire de mon Père,  
A mes chers enfants, Henri et Victor*

*« De même que l'on voit les abeilles en tribus nombreuses,  
Se presser à flots renouvelés et sortir d'une roche creuse,  
Et former une grappe volante au-dessus des fleurs du printemps,  
Tandis qu'une foule d'autres planent ici et là en même temps,  
De même ... »  
Homère, Iliade*





## TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	9	✓ <i>Rôle des situations météorologiques</i>	44
ABSTRACT	11	ii. Facteurs gouvernant l'élimination et la déposition du pollen	44
SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS	13	2.3. TRANSPORT : ETAPE CENTRALE DE LA TRAJECTOIRE	45
REMERCIEMENTS	17	i. Notion de transport passif	46
<b>INTRODUCTION</b>	<b>19</b>	✓ <i>Transport horizontal</i>	47
		✓ <i>Transport vertical</i>	48
<b>CHAPITRE 1 – ETAT DES CONNAISSANCES</b>	<b>25</b>	<b>3. MODÉLISATION ET PRÉVISION POLLINIQUE</b>	<b>50</b>
<b>1. AMBROISIE : PLANTE, POLLEN ET RISQUE</b>	<b>28</b>	3.1. MODÉLISATION EMPIRIQUE	50
1.1. AMBROISIE : DESCRIPTION, DISTRIBUTION ET RYTHMES	28	i. Analyse descriptive	50
i. Notions de physiologie végétale	28	ii. Réseaux neuronaux	52
ii. Distribution géographique	29	3.2. MODÉLISATION DÉTERMINISTE	53
iii. Saison pollinique et journée type	30	i. Modèles gaussiens de dispersion	53
1.2. ALLERGIE ET RISQUE	32	ii. Modèles Eulériens et Lagrangiens	54
i. Critères de flottabilité, abondance et toxicité	32	iii. Modèles de trajectoire	55
ii. Notion de seuil et de risques	33	iv. Modèles météorologiques et climatiques	56
iii. Situation actuelle au Québec et à Montréal	34	<b>CHAPITRE 2 – APPROCHE STATISTIQUE</b>	<b>59</b>
<b>2. TRAJECTOIRE AÉROBIOLOGIQUE ET COUCHE LIMITE</b>	<b>35</b>	<b>1. DONNÉES DISPONIBLES ET DÉMARCHÉ SUIVIE</b>	<b>63</b>
2.1. DÉCOMPOSITION DE L'ATMOSPHÈRE ET RYTHMES DE LA CLA	35	<b>2. DESCRIPTION DES SAISONS POLLINIQUES DE 1994 à 2003</b>	<b>64</b>
i. Couche limite atmosphérique	36	2.1. VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES QUANTITÉS DE POLLEN	64
ii. Couche de mélange	37	i. Fluctuations spatiales inter annuelles	64
iii. Couche résiduelle	38	ii. Fluctuations temporelles par site	68
iv. Couche nocturne stable	38	iii. Synthèse préliminaire	69
v. Présence du milieu urbain et impacts	38	2.2. EXTRÊMES ET RISQUES ASSOCIÉS	70
2.2. ÉMISSION ET DÉPOSITION : INITIATION ET FIN DE LA TRAJECTOIRE	41	i. Evolution spatio-temporelle des valeurs extrêmes	71
i. Facteurs influençant la production et l'émission du pollen	42	ii. Evolution spatio-temporelle du risque	74
✓ <i>Rôle de la température</i>	42	<b>3. ÉVOLUTION DU TEMPS À MONTREAL ENTRE 1994 ET 2003</b>	<b>77</b>
✓ <i>Rôle de l'humidité relative</i>	43	3.1. ANALYSE DES CONDITIONS METEOROLOGIQUES	77
✓ <i>Rôle du vent</i>	43	i. Conditions thermiques	77
✓ <i>Rôle des précipitations</i>	43		

## 6 - Table des matières

✓ <i>Température</i>	77	1.1. HISTORIQUE DU DÉVELOPPEMENT DU MRCC	142
✓ <i>Degrés jours de croissance (&gt; 5°C)</i>	79	1.2. PARAMÈTRES ET CARACTÉRISTIQUES	
✓ <i>Degrés jours de réfrigération (&gt; 18°C)</i>	82	TECHNIQUES DU MRCC	143
ii. Conditions d'humidité	82	<b>2. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU POLLEN</b>	<b>144</b>
✓ <i>Humidité relative</i>	82	2.1. INTRODUCTION DU POLLEN DANS LE MRCC ET	
✓ <i>Précipitations pluvieuses</i>	84	NAISSANCE DU MRCC-POLLEN	144
iii. Conditions d'ensoleillement	93	2.2. EMBOITEMENT MULTIPLE UNIDIRECTIONNEL ET	
iv. Conditions de pression atmosphérique	96	« DONWSCALING »	145
v. Conditions de vent	98	2.3. PARAMÉTRAGE DU MRCC ET DÉMARCHE	145
✓ <i>Vitesse du vent</i>	98	<b>3. PARAMÉTRAGE DU POLLEN DANS LE</b>	
✓ <i>Provenance du vent</i>	100	<b>MRCC-POLLEN</b>	<b>147</b>
3.2. ANALYSE DES TYPES DE TEMPS	106	3.1. DÉTERMINATION ET LOCALISATION DES	
<b>4. PÉRIODE DE POLLINISATION ET CONDITIONS</b>	<b>111</b>	SOURCES DE POLLEN	147
<b>ATMOSPHÉRIQUES</b>		3.2. RECONSTITUTION DU CYCLE DIURNE DU	
4.1. RELATIONS ENTRE CONDITIONS DE PRINTEMPS,		POLLEN DANS LE MRCC-POLLEN	148
D'ÉTÉ ET QUANTIÉS DE POLLEN	113	3.3. LA TRAJECTOIRE AÉROBIOLOGIQUE DU	
		POLLEN DANS LE MRCC-POLLEN	149
4.2. CORRÉLATIONS ENTRE MÉTÉOROLOGIE ESTIVALE ET		3.4. LES AUTRES PARAMÉTRAGES EXPÉRIMENTAUX	152
POLLEN DE FIN D'ÉTÉ	114	3.5. DONNÉES DISPONIBLES UTILISÉES	153
i. Analyse considérant les données globales	114	<b>4. COMPARAISON ENTRE DONNÉES OBSERVÉES</b>	
ii. Analyses considérant les années	116	<b>ET DONNÉES SIMULÉES</b>	<b>154</b>
iii. Analyse considérant la provenance du vent	117	4.1. COMPARAISON DES CONDITIONS ATMOSPÉRIQUES	154
iv. Analyse considérant les types de temps	119	4.2. COMPARAISON DES CONDITIONS POLLINIQUES	161
<b>5. ANALYSE DE RISQUE</b>	<b>120</b>	4.3. VALIDATION DE LA DÉMARCHE	174
5.1. QUANTITÉS ET TYPES DE TEMPS : UNE APPROCHE		<b>5. ÉVOLUTION SPATIO-TEMPORELLE D'UN</b>	
GLOBALE	121	<b>NUAGE D'AMBROISIE : SITUATION</b>	
5.2. RISQUE ET TYPES DE TEMPS : OCCURRENCE ET		<b>ATMOSPHÉRIQUES TYPIQUES ET ANALYSE</b>	<b>175</b>
POIDS POLLINIQUE	124	5.1. LE CYCLE DIURNE DE LA POLLINISATION DE	
5.3. PARAMÈTRES MÉTÉOROLOGIQUES ET RISQUE		L'AMBROISIE DANS LE MRCC-POLLEN	175
CROISSANT	128	5.2. UNE SITUATION ESTIVALE TYPIQUE : JOURNÉES	
5.4. RISQUE ET CONDITIONS RESENTIES LA VEILLE	130	DES 26 AU 28 AOÛT 1999	176
i. Effets des conditions météorologiques		i. Conditions atmosphériques	176
des jours précédents	130	ii. Rythmes polliniques	177
ii. Risque d'allergie et persistance des types		iii. Analyse du pic secondaire dans l'Est	
de temps	132	le 26/08/99	186
iii. Persistance du risque dans le temps	132	iv. Origine de ces pollens au cours de	
<b>6. COMPORTEMENT DU NUAGE POLLINIQUE</b>		cette séquence	189
<b>DE FIN D'ÉTÉ À MONTRÉAL</b>	<b>134</b>	v. Analyse des risques associés et remarques	
<b>CHAPITRE 3 – APPROCHE DÉTERMINISTE</b>	<b>137</b>	conclusives	189
<b>1. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE</b>		<b>CONCLUSION</b>	<b>197</b>
<b>L'ÉCOULEMENT ATMOSPHÉRIQUE : LE MODÈLE</b>			
<b>RÉGIONAL DE CLIMAT CANADIEN (MRCC)</b>	<b>142</b>		

<b>ANNEXES</b>	<b>203</b>
A1.1. L'AMBROISIE A FEUILLE D'ARMOISE	203
A1.2. TURBULENCE DANS LA CLA – ORIGINE ET MESURE	206
A2.1. STATISTIQUES NON PARAMÉTRIQUES ET ANALYSES PRÉLIMINAIRES	211
A2.2. DESCRIPTION DES CAPTEURS DE POLLEN	218
A2.3. RÉSULTATS DES TESTS STATISTIQUES, TABLES ET AUTRES DONNÉES	220
A2.4. CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ENTRE 1994 ET 2003 AU CANADA ET DANS LA RÉGION DES GRANDS LACS/SAINT LAURENT	234
A2.5. DESCRIPTION DES TYPES DE TEMPS	244
A3.1. PARAMÈTRES D'INTÉGRATION UTILISÉS POUR LES SIMULATIONS	245
A3.2. PARAMÉTRAGE DU MRCC-POLLEN ET DÉMARCHE	247
A3.3. FACTEURS MÉTÉOROLOGIQUES ET POLINIQUES MESURÉS DANS LE MRCC-POLLEN	254
A3.4. COURBES DE CONCENTRATIONS POLLINIQUES SIMULÉES AUX QUATRE POINTS DE MESURES ET TYPES DE TEMPS ASSOCIÉS	255
A3.5. SITUATION SYNOPTIQUE DES 26 ET 28 AOÛT 1999	256
BIBLIOGRAPHIE	259
CURRICULUM VITAE	26x



## RÉSUMÉ

---

Les allergies respiratoires ne cessent d'augmenter partout dans le monde au même titre que les coûts associés, touchant une part de plus en plus grande de la population.

Le pollen de l'Ambroisie est une des sources potentielles, reconnue pour ses propriétés fortement allergisantes. Caractérisé par des émissions de celui-ci dans l'air extrêmement abondantes d'août à septembre de chaque année, il n'en est que plus redoutable. Cette étude porte sur la problématique de l'ambroisie et plus particulièrement sur les moyens dont on dispose à l'heure actuelle pour comprendre l'évolution de son nuage pollinique en pleine saison de pollinisation, de même que sur ceux que l'on pourrait développer pour parvenir, à plus longue échéance, à une meilleure prévision des risques associés à sa pollinisation. Au cours de son trajet dans l'atmosphère, le pollen est soumis à l'influence directe des conditions atmosphériques. Ce jeu des paramètres météorologiques sur les quantités de pollen mesurées, retient toute notre attention. Cette recherche aérobiologique se concentre sur la grande région de Montréal qui connaît tous les ans de sérieux cas de pollinose à l'*herbe à poux*, telle que communément appelée là-bas. Originaire d'Amérique du Nord, elle y est quasi omniprésente depuis longtemps, ce qui en fait un laboratoire d'étude très intéressant.

Une revue de la littérature disponible est proposée en premier lieu afin d'aborder la question des rythmes et des caractéristiques qui en font une plante à haut risque, principale responsable des allergies respiratoires auprès de 10% de la population locale. La trajectoire aérobiologique de son pollen est ensuite décortiquée ainsi que les paramètres météorologiques qui interviennent selon divers degrés à l'occasion de chacune des étapes de ce trajet aérien. La plupart de ces effets se produisent dans les basses couches de l'atmosphère, dont le caractère turbulent est particulièrement déterminant du devenir du pollen. Afin d'étudier ces comportements un certain nombre de techniques de mesure et d'évaluation ont déjà été testées et publiées. Elles sont décrites et nous proposons dans les deux prochaines étapes deux méthodes complémentaires pour son étude.

Parmi elles, une analyse statistique du comportement du nuage d'ambroisie durant la période 1994-2003 est présentée à partir de données d'observation. Cette décennie est marquée par une période particulièrement

pollinique avec les années 1998 à 2001, associée à une série de printemps et étés plutôt anormalement secs et chauds. Une analyse globale du risque tenant compte des types de temps expérimentés à Montréal permet d'identifier des situations météorologiques plus ou moins « à risque » tenant compte tant de leur fréquence d'occurrence que de leur contribution à la charge pollinique globale saisonnière. Il en ressort que les plus fréquentes sont aussi les plus grandes contributrices, mais qu'il ne faut pas négliger pour autant d'autres situations qui, du fait de leur rareté, ne pèsent pas aussi lourd dans la balance pollinique mais qui, au cas par cas, peuvent s'avérer extrêmement risquées. Quoiqu'il en soit, le niveau du seuil clinique étant largement dépassé au cours de chacune des saisons analysées, la situation demeure globalement critique à Montréal.

Si l'observation in situ et l'analyse statistique des données offrent une image cohérente et intéressante des risques polliniques potentiels au dessus d'une région donnée, seules des analyses plus détaillées à l'aide d'outils numériques perfectionnés intégrant les principes fondamentaux de la physique de l'atmosphère tels les modèles numériques régionaux du climat peuvent offrir l'occasion d'analyser avec un détail spatio-temporel inconnu jusqu'alors, le comportement d'un nuage pollinique simulé qui se veut être aussi proche que possible de la réalité. Cette dernière approche se veut innovante et présentant un potentiel d'avenir non négligeable. La méthode par emboîtement multiple qui a été utilisée, permet de simuler le comportement du nuage pollinique de l'ambroisie sur une grille centrée au-dessus de la grande région de Montréal, comptant 60X60 nœuds de calculs distancés chacun de 1 km et 25 niveaux dans la verticale. Les résultats sont sauvegardés toutes les 15 minutes. Ceci confère l'énorme avantage de pouvoir étudier l'évolution spatio-temporelle du nuage avec une précision jusqu'alors impossible avec la seule observation sur le terrain et les techniques d'échantillonnage disponibles. La trajectoire aérobiologique est reproduite dans sa totalité dans le modèle, de l'émission, jusqu'à la déposition du pollen en passant par sa dispersion. L'émission est prescrite suivant une carte de localisation des sources disponible et tient compte pour la détermination des flux, de paramètres issus de la littérature. Une fois le pollen pris en charge par l'atmosphère, il est soumis à l'évolution thermodynamique de la couche limite atmosphérique.

Une situation typique de fin d'été est simulée et analysée. Globalement la simulation se comporte selon les tendances de l'observation. Elle permet entre autre de voir à quel point de petites fluctuations des conditions atmosphériques peuvent affecter le développement du nuage de façon significative et de fait, les zones touchées par des niveaux de risque plus ou moins élevés. Les résultats obtenus sont tout à faits encourageants et bien qu'encore difficilement comparables dans le détail à l'observation, ouvrent sans doute une nouvelle voie de recherche pour l'aérobiologie.

## ABSTRACT

---

Allergic rhinitis as well as associated costs are constantly increasing, affecting a proportion always larger of the population across the world.

Ragweed is a source of pollen well known for its high allergenic properties. Characterized by heavy emissions of the pollen in the air from August to October of each year, its allergenic potential is greatly enhanced. This study deals with the problems induced by ragweed pollen and more specifically with the means currently available to understand the pollen cloud evolution during the pollination season. In addition to the analysis of the pollen cloud, another approach that could be developed to achieve in the future better pollination risk forecasts is presented. While travelling in the air, the pollen is directly influenced by the atmospheric conditions. The focus will be on the interplay of the meteorological parameters over the sampled pollen concentrations. This research under the theme of aerobiology, concentrates on the greater Montreal area which experiences each year serious cases of pollinosis related to ragweed (or “herbe à poux”, as it is locally referred to). Coming from North America, it has long been endemic, which makes the region an attractive research laboratory.

A review of the available literature is proposed first, in order to present an overview of the questions of rhythms and characteristics that make ragweed a high risk plant, responsible for more than 10% of the declared local allergic rhinitis. The aerobiological pathway of the pollen is then analyzed as well as the meteorological parameters that interfere at various degrees during each step of its transport in the atmosphere. Most of the effects occur in the lowest levels of the atmosphere where the turbulence is especially determinant of the pollen concentrations. In order to study these behaviours a number of measurements techniques and evaluation tools have already been tested and published. They are described and two complementary approaches are proposed in the following.

Among them, a statistical analysis of the pollen cloud behaviour over the period 1994-2003, is presented based on observed data. This decade is characterized by specially pollinic years from 1998 to 2001, associated with above-normal dry and hot springs and summers. A global analysis of pollinic risk according to weather types experimented in Montreal helps to identify more or less

risky meteorological conjunctions taking into account frequency of occurrence and contribution to the global seasonal pollen load. It appears that the most frequent are also the larger contributors, what does not mean that one can neglect other situation, because even if they are less frequent, they are not necessarily less intense. Although the clinical threshold is high during all the seasons studied, the situation remains globally critical in Montreal.

If in situ observation as well as statistical analysis offer a consistent and interesting picture of potential pollinic risks over a region, more detailed analysis with the help of advanced numerical tools integrating fundamental principals of atmospheric physics, namely regional climate models, may offer the opportunity to analyse with very high spatio-temporal resolution, the simulated pollen cloud behaviour that should be as close as possible to the real one. This approach is innovative and presents a significant potential for the future. The multiple self-nesting methods that are used to simulate the behaviour of the ragweed pollen cloud over a grid centred above Montreal, includes 60X60 computation nodes with a 1 km spacing and 25 levels in the vertical. Results are saved every 15 min. That confers the enormous advantage of being able to study the spatio-temporal evolution of the cloud with a precision till now unavailable from field measurements as well as from available sampling techniques. The aerobiological pathway is reproduced in full, from the emission to the pollen deposition including transport and dispersion. Emission is prescribed according to an available localisation source map and takes into account parameters obtained from the literature for the determination of fluxes. Once the pollen is embedded within the air flow, it is subjected to the thermo-dynamical evolution of the boundary layer. Typical end of summer conditions are simulated and analysed. Globally the simulation behaves like the observed tendencies. It allows to emphasize inter alia that small fluctuations of atmospheric conditions may affect significantly the development of the pollen cloud and by the same occasion, the areas affected by more or less important levels of risk. Results are encouraging and open a new field of research for aerobiology.





## SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

OMS	Organisation Mondiale de la Santé
CLA	Couche limite atmosphérique
MRCC	Modèle régional de climat canadien
UQAM	Université du Québec à Montréal
LAM	Limited Area Model
MCG	Modèle de la circulation générale de l'atmosphère
CCRM	Centre coopératif de recherche méso échelle
MC2	Modèle méso-échelle compressible communautaire
HR	Humidité relative en %
$\mu\text{m}$	Micron ( $10^{-6}$ m)
$\text{NO}_x$	Oxydes d'azote
$\text{O}_3$	Ozone
$\text{SO}_2$	Dioxyde de soufre
ORL	Oto-rhino-laryngologie
RNSA	Réseau National de Surveillance Aérobiologique
CUM	Communauté Urbaine de Montréal
$^{\circ}\text{C}$	Degrés Celcius
km	Kilomètre
$z_i$	Hauteur de mélange
$\theta_v$	Température potentielle virtuelle
M	Vitesse moyenne du vent
u	Composante du vent moyen en x
v	Composante du vent moyen en y
c	Concentration moyenne en polluants
mph	Mile per hour
m	Mètre
s	Seconde
$\delta u / \delta Z$	Gradient de vent en fonction de l'altitude
NW	Nord Ouest
$u'$	Ecart par rapport au vent moyen selon x
CLU	Couche limite urbaine
$\Delta T_{u-T \text{ max}}$	Intensité de l'îlot de chaleur maximale en $^{\circ}\text{C}$
ARIMA	Modèle intégrant un processus régressif et les moyennes mobiles
OML	Operationelle Meteorologiske Luftvalitetsmodeller
OGM	Organisme génétiquement modifié
APRA	Adventitious pollen risk assessment
CO	Monoxyde de carbone
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
HYSPLIT	Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory
SMOP-2D	Stochastic Mechanistic Model for Pollen Dispersion and Deposition in 2D
NMC	Centre National Météorologique
MM5	Meso-scale Model from PSU/NCAR
PSU	Pennsylvania State University
LST	Local standard time
RAMS	Regional Atmospheric Modeling System
HYPACT	Hybrid Particle and Concentration Transport Model
KAMM	Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model

## 14 - Abréviations

---

ESS	Environmental Software and Services
SISL	Algorithme semi-lagrangien et semi-implicite
Tmoy	Température moyenne en °C
Prec	Précipitations en mm
Pmsl	Pression moyenne au niveau moyen de la mer en hPa
DD>5°	Degrés jour de croissance supérieurs à 5°C
Ins	Insolation en h
h	Heure
CV	Centre-ville
VL	Ville Lasalle
HAE	Heure avancée de l'Est
UTC	Coordinate Universal Time
$r_s$	Coefficient de corrélation de rang de Spearman
Nb j	Nombre de jours
[AMB]	Concentration de pollen d'ambrosie en grains/m <sup>3</sup> d'air
HAP	Ambrosie (ou Herbe à poux)
ACDD5	Accumulation des degrés jour de croissance
moy	Fait référence à une moyenne
norm	Fait référence à une normale climatique ou une période de 30 ans
PET	Pierre-Elliott Trudeau
KW	Test de Kruskal-Wallis
DIR	Fait référence à une classe de direction du vent
TT	Type de temps
TT1=DM	Type de temps tempéré sec
TT2=DP	Type de temps polaire sec
TT3=DT	Type de temps tropical sec
TT4=MM	Type de temps tempéré humide
TT5=MP	Type de temps polaire humide
TT6=MT	Type de temps tropical humide
TT66=MT+	Type de temps anormalement chaud et humide
TT7=TR	Type de temps de transition
PM	Particulate matter
$\alpha$	Seuil de signification pour la validité des tests statistiques
J-1	Jour précédent
NARCM	Northern Aerosol Regional Climate Model
NCAR	National Center for Atmospheric research
NCEP	National Centers for Environmental Predictions
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
CAM	Canadian Aerosol Module
CLASS	Canadian land surface scheme
E(t)	Emission d'un plant d'ambrosie en nombre de grains par unité de temps
$M_0$	Masse d'un grain de pollen
N/m <sup>2</sup>	Nombre de plants par unité de surface en mètre carré (densité)
TR	Transport de pollen (TR01 : intérieur de l'île, TR02 : extérieur, TR03 : total)
$P_{ds}$	Déposition sèche
$P_{dh}$	Déposition humide
$F_p$	Flux de pollen
ALLW	Albédo pour $0.68 < \lambda \leq 4 \mu\text{m}$
P1ST	Température de l'air à la surface
P1PNM	Pression atmosphérique de surface
P1VIT	Vitesse du vent à la surface
P1DIR	Direction du vent à la surface
PPTEMP	Température de l'air pour des niveaux standard
PPVIT	Vitesse du vent pour des niveaux standard
PPDIR	Direction du vent pour des niveaux standard
PPHR	Humidité relative pour des niveaux standard
DR	Dépôt de pollen (DR01 : intérieur de l'île, DR02 : extérieur, DR03 : total)

$\Gamma_s$	Gradient adiabatique de l'air sec en °C km <sup>-1</sup>
$\Gamma_h$	Gradient adiabatique de l'air humide en °C km <sup>-1</sup>
GE	Gradient environnemental
$\theta$	Température potentielle
$C_p$	Chaleur spécifique de l'air à pression constante en K m <sup>-1</sup>
K	Kelvin
$K_M$	Coefficient de diffusion turbulente en m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
Z	Hauteur
k	Constante de Von Karman
g	Accélération gravitationnelle en m s <sup>-2</sup>
$R_i$	Nombre de Richardson
AC	Champ de végétation dans le modèle
$D^p$	Terme dynamique déterminant des quantités de pollen
$P^p$	Terme physique déterminant des quantités de pollen
$P_{p,h}^p$	Diffusion horizontale du pollen
$P_{p,v}^p$	Diffusion verticale du pollen
$P_{em}^p$	Terme caractérisant l'émission de pollen
$P_{dep}^p$	Terme caractérisant le dépôt de pollen
$P_{ds}^p$	Terme caractérisant le dépôt sec de pollen
$P_{dh}^p$	Terme caractérisant le dépôt humide de pollen
$V_s$	Vitesse terminale de sédimentation (sèche) en m s <sup>-1</sup>



## REMERCIEMENTS

---

Cette thèse est le résultat d'un très long parcours qui m'a mené de la France en Suisse en passant par le Québec ; un parcours de vie, semé d'embûches, de doutes, de découragements mais aussi et surtout de joies, de grands bonheurs portant les noms de Henri et Victor, d'enthousiasme et en tout temps et sans jamais faiblir, animé de passion. La passion de savoir, la passion de découvrir, la passion d'aller au bout d'un rêve, de Mon rêve....

A tous ceux et celles qui ont cru en ce rêve, qui ont eu confiance en moi, je dis de tout cœur : Merci !

Une personne m'a tendu la main pour me remettre en chemin alors que je n'osais plus y croire. Grâce à elle, j'ai retrouvé un encadrement scientifique, un cadre de travail au combien plaisant et apprécié, des moyens matériels, le soutien et les encouragements toujours renouvelés d'un ami devenu. J'adresse toute ma reconnaissance et ma gratitude au Professeur Martin Beniston, qui en plus d'avoir accepté de prendre en main la direction de cette thèse, a fait preuve tout au long de ces années à Fribourg, d'une Humanité comme seul peu de monde sait en témoigner. Merci Martin !

C'est aussi tout un Institut que je souhaite remercier. La Géographie est un petit monde aux grands horizons. Un monde dans lequel je me suis sentie « chez moi ». Je dis merci très chaleureusement à tous mes collègues professeurs, assistants et secrétaires, qui sans toujours savoir où j'en étais, m'ont à plusieurs reprises témoigné leurs encouragements. Je souhaite dire un merci plus spécial au Professeur Claude Collet pour ses judicieux conseils en statistiques, au Dr Reynald Delaloye pour les discussions partagées, à Sylvie Bovel-Yerly pour son imperturbable bonne humeur et à Marie Descloux pour son soutien et son amitié. Je tiens aussi à dire merci à mes collègues de bureau Paula Casals et Christophe Etienne, pour notre entente et les moments passés à nous encourager mutuellement. Merci à tous mes collègues du Groupe Climat avec qui il a toujours été très agréable de travailler. Enfin, je souhaite remercier du fond du cœur un collègue plus que particulier, le Dr Stéphane Goyette. Pour tous les moments que nous avons partagés sur cette thèse, à l'université comme à la maison, tous ces moments pendant lesquels tu m'as aidé et encouragé à me remettre sur les rails de la recherche en me coachant à l'occasion

de mon immersion dans le monde de la modélisation climatique, pour nos nombreuses discussions et échanges d'opinions, mais aussi pour ton affection, ta compréhension et ton soutien, pour l'entente familiale qui nous a permis, au prix de nombreuses concessions, de mener à bien ce projet que tu as compris être si important pour moi, je te dis très sincèrement merci !

Je tiens aussi à remercier le Professeur et ami Jean Pierre Blanchet de l'UQAM, instigateur de longue date de cette ambitieuse idée de simulation pollinique. Merci de m'avoir offert la possibilité de réaliser ce projet et d'enrichir ainsi le projet initial. Je n'oublierai pas ses nombreux encouragements et la prudence à laquelle il m'a invité. Il m'a donné la possibilité de travailler avec Rodrigo Muñoz Alpizar avec qui j'ai passé de nombreuses heures à décoder le fonctionnement du modèle. Merci Rodrigo pour ta patience, pour toutes les connaissances que tu m'as transmises. Merci aussi à Yan Saint-Gelais qui a fait son possible pour me prêter main forte dans des moments d'incertitude. Je tiens aussi à remercier le Professeur Michèle Garneau qui m'a fait confiance et m'a remis une base de données polliniques conséquente me permettant de mener à bien cette entreprise.

Je tiens aussi à dire un très grand merci au Professeur Antoine Guisan de l'Université de Lausanne d'avoir accepté « à la volée » de siéger sur le comité d'évaluation de cette thèse en dépit d'un emploi du temps très chargé. De même, je remercie le Professeur André Strasser d'avoir accepté la tâche de président du jury et de m'offrir l'opportunité de publier cette thèse dans la série Géofocus.

J'ai eu par ailleurs l'occasion d'établir des contacts avec différentes personnes intéressées par la question de l'ambrosie à Montréal. Les échanges que j'ai pu avoir avec elles furent appréciés. Je tiens à remercier Monsieur Claude Gagnon du Réseau de surveillance de la qualité de l'air de la « Direction de l'Environnement de la Ville de Montréal » pour m'avoir donné accès à une base de données polliniques, importante et fort appréciable. Je me tourne aussi vers sa collègue Madame Rachel Mallet pour les informations qu'elle m'a transmises. Merci à « Environnement Canada » en la personne de Jennifer Milton et de ses collègues pour l'obtention d'un grand nombre de données météorologiques. Je pense

aussi à Monsieur Jean Pierre Beaumont du Service de l'environnement et des études d'intégration au milieu de la Direction de la recherche et de l'environnement auprès de la Direction générale des infrastructures et des technologies Ministère des Transports du Québec, à Madame Lise Fafard du Centre de Sécurité civile de la Ville de Montréal, à Monsieur Frédéric Guay, Assistant de recherche à Ouranos - Consortium sur les changements climatiques, à Madame Claudine Christin de la Direction de la Santé publique de Montréal-centre. Qu'elles acceptent mes remerciements.

J'ai également une pensée pour tous les professeurs rencontrés au cours de mon cursus de formation qui, à leur façon, m'ont aidé à trouver ma voie. J'ai notamment une pensée toute spéciale pour le Professeur Marcel Leroux qui m'a communiqué sa passion du climat et qui, de près ou de loin, s'est toujours intéressé à ma recherche.

Mes remerciements vont aussi vers mes collègues de L'École d'Ingénieurs et d'Architectes de Fribourg. Je pense en particulier au Dr Raphaël Compagnon de qui en m'engageant, il y a quelques années, a témoigné son intérêt pour mon travail et a contribué à me redonner confiance en moi. Merci pour cette belle collaboration. Un grand merci à Calixte Cathomen qui a largement contribué à la mise en page finale de cette thèse ainsi qu'à Michel Mallet pour ses conseils judicieux.

Enfin, il est des personnes, nombreuses, qui de prêt ou de loin ont toujours été derrière moi, prêtes à me soutenir, et à m'encourager. Je pense en tout premier lieu à ma famille si chère; en particulier à ma mère qui m'a donné la chance de pouvoir faire des études et a su me transmettre à son image, curiosité, courage, volonté et persévérance. Tu as toujours été là, pour nous, pour nos enfants. Je ne te le dirai jamais assez merci! Je pense aussi à ma sœur Anne Sophie, toujours présente par ses attentions. Tu m'as soutenu toutes ces années. Tu t'es occupée de tes neveux autant que tu l'as pu afin d'alléger ma tâche. Merci aussi à Christophe qui a, je crois, très vite compris l'importance de tes interventions. Merci aussi à mes frères Rémy et Hervé et leurs familles qui ont toujours montré de l'intérêt pour ce que je faisais. Nombreux sont les amis de partout qui m'ont à leur manière permis d'aller jusqu'au bout. Certaines sont devenues de vraies «mamas» pour mes enfants, les accueillant, me remplaçant à l'occasion. Je pense à Marcela, Fabienne, Corinne, Florence et Florence, Nicole et Antoinette et à leurs familles qui sont toutes des havres accueillants à tout moment. Sans vous toutes, je n'aurais tout simplement pas pu aller si loin! Merci à Jacques d'avoir passé du temps à me relire et à t'intéresser à ma recherche, à Philippe d'avoir relu Homère à la recherche de quelques vers antiques. Je pense aussi à Maria Luisa, Christian et Marie France, Sylvie et Hubert, Prisca et Vincent, Pascale, Sylvie et Didier, Agnès, Antonio et Sara, Catherine, Xavier et

Valérie, Julie, Yaga, Pierre David et Line, Geneviève et Michel, Danièle, Emmanuelle, Lorie et vos familles ... Toutes et tous, rencontrés au détour de mes études et de nos déménagements successifs avez toujours su employer les mots pour me soutenir. Merci!

L'amour de mes enfants enfin a été ma force. Leurs rires et leurs bêtises m'ont permis de garder les pieds sur terre! Je souhaite qu'ils retiennent de cette histoire de notre vie, qu'il vaut la peine de se donner les moyens de puiser au fond de soit l'énergie pour aller au bout de ses rêves!

Des personnes sont parties beaucoup trop tôt mais leur souvenir reste, tel une source sans fin d'énergie quand le courage manque, à l'image des batailles qu'elles ont menées! Je ne les oublie pas... Je dédie ce travail à la mémoire de mon père.

## INTRODUCTION

Dans son rapport 2004, l'organisation mondiale de la santé (OMS) mentionne: « L'allergie constitue un problème de santé à l'échelle mondiale. Elle touche une proportion importante de la population de toutes les tranches d'âges. Pour des raisons mal connues, sa fréquence globale est en augmentation ». Toujours selon l'OMS, les allergies se situent au quatrième rang des maladies dans le monde et en 2010 la moitié de la population occidentale sera concernée (Ozanam, 2003). L'allergie respiratoire est la réponse typique observée chez l'être humain sensible à l'inhalation de certains types d'aéro allergènes. La rhinite, communément appelée rhume des foins ou pollinose et l'asthme en sont les deux entités cliniques principales selon le rapport sur la prévalence et la gravité des symptômes d'allergie respiratoire chez les résidents de l'île de Montréal (Goulet et al., 1996). Ces symptômes peuvent être déclenchés par une gamme importante de micro-organismes parmi lesquels il sera ici fait état de grains de pollen dont le diamètre est compris entre 10 à 100 micromètres.

L'objectif de cette recherche est de suggérer une méthodologie qui permette d'étudier le comportement d'un nuage pollinique dans ses relations complexes avec les conditions du milieu atmosphérique. Deux volets sont proposés, l'un, classique et statistique et l'autre, plus novateur et déterministe.

La cause de ces manifestations allergiques qui fait l'objet de cette recherche est le pollen de l'ambrosie et plus spécifiquement dans le contexte montréalais où il est source chaque année de sérieux problèmes de santé au sein de la population locale. Il s'agit en effet de la principale source d'allergie respiratoire de fin d'été. Du fait de son caractère anémophile, il est produit en des quantités extrêmement abondantes afin de compenser les pertes. Ainsi en 1986, il compte pour 24 à 40% de la part totale des pollens mesurés à Montréal (Durand, 1986), représente 75% de la masse pollinique totale quotidienne durant sa période de pollinisation du début août à la mi-septembre ainsi que 96% du total pollinique reconnu comme étant allergène (Comtois, 1995). Il est enfin la cause, à lui seul, de 52 à 89% des symptômes annuels de pollinoses déclarés (Comtois et al., 1988). En 1989, Santé Québec l'élève au rang de 6<sup>ième</sup> source principale de problèmes de santé rencontrés au Québec. En 1994<sup>1</sup>, la Direction de la Santé Publique de Montréal de même que le Comité Provincial

de Santé Environnementale du Québec estiment les coûts économiques liés aux effets allergènes de l'ambrosie à 50 millions de dollars canadiens pour la seule année 1992. Actuellement, la rhinite coûterait aux Québécois atteints par la maladie plus de 85 millions \$CAD annuellement pour l'achat d'antihistaminiques. D'après la Direction de la Santé Publique à Montréal, en 1994, environ 10% de la population résidente de Montréal souffre de ce problème. Encore plus récemment, en 1996, Goulet et ses collaborateurs évaluaient à 19.2% la part de la population totale montréalaise affectée, ceci ayant pour incidence qu'un ménage sur trois abrite au moins une personne qui souffre d'allergie respiratoire. Toujours selon le rapport sur les maladies respiratoires au Canada (2001). Parmi les personnes souffrant de rhinite allergique, 8.9% d'entre elles se disent assurées que l'herbe à poux en est la cause. Ces chiffres impressionnants témoignent de l'ampleur du problème. La Direction de la Santé Publique de Montréal en a fait depuis plusieurs années son cheval de bataille. Les derniers résultats publiés dans le Flash Herbe à Poux (09/2003) ne sont guère encourageants. Comme nous pouvons le voir (Figure 0.1) l'évolution annuelle de l'indice du pollen d'ambrosie à Montréal entre 1977 à 1991, communément appelé herbe à poux au Québec, montrait une tendance moyenne annuelle à la baisse alors que depuis 12 ans elle semble augmenter de nouveau depuis le début des années 90.

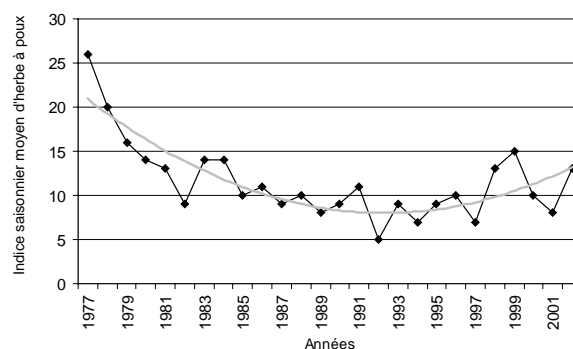


Figure 0.1 : Indice de pollen de l'herbe à poux. Variation annuelle de 1977 à 2002. Réseaux de Surveillance de la Qualité de l'air. Ville de Montréal. Service Environnement, Voirie et Réseaux. Direction de l'Environnement. Adapté d'après Le Flash Herbe à Poux, sept 2003

Les problèmes générés par ce pollen dont le potentiel



allergène est extrême (5 sur une échelle allant de 1 à 5) sont réels et nombreux. L'objectif principal de cette recherche est d'étudier le développement et le déplacement de son nuage au-dessus de la grande région montréalaise. L'ambrosie a déjà donné lieu à de très nombreuses recherches dont l'ampleur de la bibliographie proposée dans le chapitre 1 témoigne. En effet son abondance durant sa période de pollinisation et le fait qu'il soit facilement reconnaissable (Annexe 1.1), facilitent son comptage au microscope tout en limitant les risques d'erreurs et en fait ainsi un objet d'étude de choix. La région de Montréal a, à plusieurs reprises déjà, fait l'objet d'études et de suivi des colonies d'ambrosie sur le terrain. La propagation inquiétante de la plante est toujours sous surveillance par le biais d'instances telles le Réseau de Surveillance de la Qualité de l'Air de la Ville de Montréal, la Direction de la Santé Publique, le Ministère des Transports du Québec et d'autres institutions universitaires. La plante est, de ce fait, bien illustrée dans le contexte montréalais et québécois dans la littérature tant à propos de la physiologie végétale qu'à propos de son pollen. De plus, l'île de Montréal et la grande région métropolitaine demeurent un terrain d'étude fort appréciable, du fait notamment de leur grande diversité en terme de types d'occupation du sol et types d'activités humaines (métropole, centre urbain dense Nord Américain, zones suburbaines résidentielles et/ou semi résidentielles, zones agricoles, friches et zones industrielles, nœuds autoroutiers...) mais aussi du fait de la présence de plusieurs cours d'eau (Figure 0.2).



Figure 0.2 : Photo satellite de la grande région de Montréal. STS085-506-081 High resolution

Cette grande variété engendre des conditions favorables à l'implantation et à l'installation de la plante. Les cours d'eau jouent aussi un rôle sur la météorologie régionale et locale. La présence du fleuve Saint Laurent (Figure 0.3), immense réservoir d'eau qui alimente le lac de Deux Montagnes à l'Ouest de l'île et qui s'étire sur tout le flanc Sud de l'île, de même que de la rivière des Prairies au Nord et du Canal Lachine à Ville Lasalle,

sont autant d'éléments naturels qui contribuent à générer des situations d'influence majeure sur le comportement global du nuage d'ambrosie en influençant la structure thermique de la basse atmosphère, la couche limite atmosphérique (CLA).

A la différence de la plupart des études déjà existantes, nous abordons la question à l'aide d'une problématique et avec des moyens différents et nouveaux. Ce travail s'insère dans le domaine de l'aérobiologie, officiellement organisée sous l'égide du Programme Biologique International (1974) alors qu'elle était en plein essor et définie par Gregory (1973) puis Edmonds (1979) comme étant «l'étude des organismes (biologiques ou non) dispersés passivement dans l'atmosphère, de leur identité, leurs comportements, leurs mouvements et leurs moyens de survie ainsi et surtout que de leurs effets sur les êtres vivants».

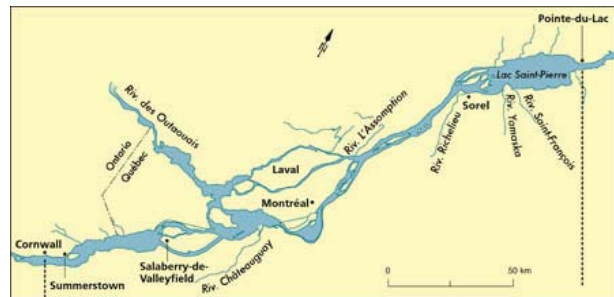


Figure 0.3: Voies d'eau à Montréal. Source : Environnement Canada. Centre Saint Laurent [http://www.qc.ec.gc.ca/csl/inf/inf002\\_01\\_f.html](http://www.qc.ec.gc.ca/csl/inf/inf002_01_f.html) consulté le 14.10.05

La conceptualisation de l'approche systémique (Figure 0.4) qui la caractérise (Edmonds, 1979 dans Isard et al., 2001), facilite les interactions biologiques et météorologiques complexes qui gouvernent le mouvement des particules biologiques aéroportées. Elle se situe de la sorte au confluent de nombreuses disciplines dont, entre autre, la (micro) biologie et la climatologie appliquée<sup>2</sup> qui est la partie de la climatologie (et de la météorologie appliquée) qui se rapporte à l'utilisation des connaissances relatives au climat dans l'intérêt des activités humaines. Ces connaissances croisées en matière de biologie et d'écologie de la plante, de climat et de physique de l'atmosphère sont au coeur de cette étude. Les facteurs météorologiques qui caractérisent l'état de l'atmosphère en un moment et en un lieu donnés, influencent très largement les phases du modèle aérobiologique que sont : l'émission, la dispersion, le transport des particules biologiques et la déposition. Les interactions entre ces deux sciences sont donc abondantes mais plus ou moins faciles à percevoir lorsque vient le moment de les qualifier et de les quantifier.

Les conditions atmosphériques sont en effet déterminantes de la dispersion des pollens et du développement du nuage

<sup>2</sup> Définition tirée du site internet <http://eumetcal.meteo.fr/euromet/glossary/appliedc.htm> consulté le 22/02/05



pollinique de fin d'été au-dessus de la région à l'étude. Nous supposons que certaines conjonctions de conditions atmosphériques favorisent ou limitent au contraire l'intensification du risque allergique pour la population locale. C'est ainsi que nous aborderons dans le chapitre 2 la première étape de cette recherche. Elle s'appuie sur une classification de types de temps Nord Américains (Sheridan, 2002) qui permet de caractériser les masses d'air survolant Montréal pendant la période concernée. Nous imaginons qu'un niveau de risque allergique donné est associé à un ou plusieurs types ou successions de types de temps. Nous nous attendons à être éventuellement en mesure d'associer des niveaux de risques d'allergie à un type de temps particulier voire une conjonction de plusieurs d'entre eux, telle une séquence préalable au jour dudit risque par exemple. Cette hypothèse est émise en considérant qu'un type de temps est représentatif des conditions atmosphériques d'échelle synoptique réunies au-dessus de la grande région métropolitaine un jour donné. Il intègre l'ensemble de l'information météorologique caractérisant la masse d'air. L'intérêt de cette approche est manifeste dans la mesure où elle pourrait ultimement faciliter la prévision du risque sur la base d'une observation régionale et sans avoir recours à de trop nombreux calculs. Cette classification des types de temps étant mise à jour et accessible au jour le jour sur la toile internet, il pourrait être relativement aisé de parvenir à une information fiable et efficace de la population. Ce type d'analyse n'est certes pas innovateur mais en dépit de cela, il n'existe pas à l'heure actuelle d'étude qui ait pu formellement parvenir à un tel résultat dans le cas de Montréal.

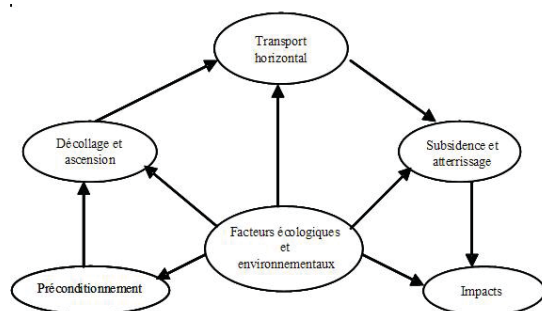


Figure 0.4 : Représentation du modèle aérobiologique, adapté de l'anglais d'après Benninghoff et Edmonds, 1972 et repris par Isard et Gage, 2001. Préalablement appelée trajectoire aérobiologique, ce modèle présente dans l'ordre les différentes étapes par lesquelles, voyage tout organisme transporté passivement par l'atmosphère

Parallèlement, une seconde approche abordée dans le cadre du chapitre 3, est proposée qui vise à comprendre avec plus de détail la relation existant entre le pollen de l'ambroisie et les paramètres météorologiques caractéristiques du climat montréalais de fin d'été. Une méthode est proposée qui permet de simuler le

comportement du nuage de pollen dans l'atmosphère. Cette simulation est rendue possible grâce à la modélisation numérique et à l'utilisation d'un outil très perfectionné et complexe, le modèle régional de climat canadien (MRCC) dont une description détaillée est proposée par Laprise et *al.* (1998) et auquel des améliorations ont été apportées pour rendre possible la prise en compte du déplacement de traceurs tels le pollen (Gong et *al.*, 2001). La mise en œuvre de ces expériences est le fruit d'une collaboration entre l'Université de Fribourg et celle du Québec à Montréal (UQAM). La raison première de l'utilisation du MRCC est de reproduire de la manière la plus fiable possible les conditions météorologiques expérimentées dans la réalité par le nuage de pollen au dessus de la grande région métropolitaine. Plusieurs tests préliminaires tout à fait encourageants ont été réalisés sur des périodes de 2 à 4 jours (Muñoz-Alpizar et *al.*, 2001 ; Goyette-Pernot et *al.*, 2004, 2003a, 2003b, 2002). Afin d'étudier son comportement sur de plus longues périodes, 7 simulations numériques de saisons d'ambroisie ont été réalisées, correspondant à 7 périodes d'environ 35 jours consécutifs à compter du 10 août de chaque année entre 1997 et 2003. Au cours de ces mêmes années, des données ont été mesurées sur le terrain en 4 points différents de l'île, telles des témoins de la « réalité observée ».

Cette démarche présente un intérêt très particulier. Nous pensons en effet que, plus que le type de temps lui-même, l'état de la stabilité de l'air dans les bas niveaux joue un rôle déterminant sur les concentrations de pollen mesurées. Il est pour cela indispensable de connaître la structure thermique verticale de l'atmosphère ainsi que le profil du vent au-dessus de la région, voire au-dessus de points distribués dans l'espace selon ce que l'on veut identifier ou expliquer, analyse que le modèle nous permet de faire selon les 3 dimensions spatiales et le temps. Nous nous attendons à ce que le contenu pollinique de l'air de même que les conditions et taux de déposition soient directement conditionnés par l'état de la stabilité de l'atmosphère dans les bas niveaux en particulier. La stabilité atmosphérique, la turbulence de même que les interactions avec la topographie ou encore la présence de surfaces en eau ... jouent des rôles significatifs sur la distribution en 3-D du pollen dans l'air une fois émis par une source et pris en charge par l'atmosphère. Ces flux à proximité de la surface sont le reflet de l'état de la CLA. Ils sont typiques de quelques dizaines de mètres de la surface à plusieurs centaines de celle-ci en réponse au forçage radiatif à la surface. Cette couche d'air connaît à cet égard des rythmes diurnes qui font qu'elle est plus développée au moment le plus chaud de la journée lorsque la turbulence y est la plus forte. On peut donc s'attendre à ce qu'à ce moment là aussi, la dilution du pollen soit la plus grande et la plus homogène. Enfin si le transport et la dispersion du pollen sont gouvernés par les fluctuations du comportement de la CLA, les processus de lessivage et déposition associés aux précipitations ont quant à eux

pour effet de réduire voire éliminer complètement le pollen en suspension. Le schéma présenté à la figure 0.5 illustre de manière simplifiée mais claire ces différents aspects.

Il est nécessaire dans tous les cas de figure de tenir compte de l'échelle du phénomène en question. Ainsi, y a-t-il des risques pour qu'une situation atmosphérique d'échelle synoptique très stable rime avec risque d'allergie très élevé du fait de très grandes concentrations de pollens maintenues dans les basses couches de l'atmosphère à proximité de la surface et donc des êtres humains. De la même manière, il est possible de s'attendre à ce qu'une situation fortement instable et de grande échelle également, tel le passage d'un front engendre a priori des risques moins élevés du fait que le pollen a plus de chance de se disperser. Il faut toutefois, ici encore, tenir compte de l'intensité des brassages qui peuvent avoir des effets inverses en rabattant au sol des quantités non négligeables de pollen générant ainsi localement des « poches de risque élevé », voire encore en transportant au-dessus de la région à l'étude des quantités importantes de pollen venu d'ailleurs. De plus, hormis les phénomènes d'échelle synoptique, les processus plus locaux doivent être considérés, directement associés aux conditions spatiales particulières de micro échelle qui interfèrent et génèrent de nouveaux effets très localisés et que sont absolument incapables d'appréhender la seule observation et l'analyse des informations d'échelle plus grande tel qu'il est habituellement fait en aérobiologie. Il va de soit que la présence des masses d'eau déjà citées doit avoir un effet sur la circulation atmosphérique locale à un certain moment de la journée suivant où l'on se trouve. Autre cas de figure, le centre-ville de Montréal est coincé entre le Mont Royal qui culmine à 230 m au-dessus du niveau de la mer (Figure 0.6) et le fleuve Saint Laurent.

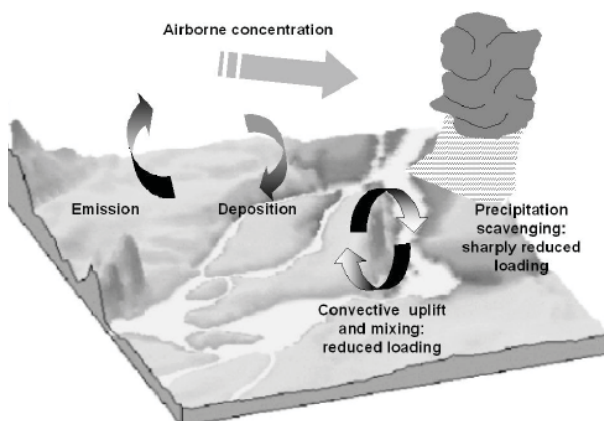


Figure 0.5: Illustration schématique de l'influence des processus de la couche limite atmosphérique sur la charge pollinique de l'air. Adapté de Nuñez-Alpizar et Blanchet, 2002

D'allure Nord Américaine, ce centre-ville hérissé de gratte-ciels génère par son activité, sa localisation dans

l'espace, le revêtement de ses surfaces et finalement sa typicité, des conditions de dispersion particulières. Il semble d'après les résultats de Gagnon (1991) qu'il agisse tel une trappe à pollen, emprisonnant de nombreux pollens d'ambrosies chaque été. Même si nous ne pouvons prétendre dans cette étude descendre au niveau de la rue, les spécificités du modèle que nous utilisons, intègrent un schéma de surface urbain, kilométrique, qui tient compte de la rugosité de la surface urbaine moyenne.

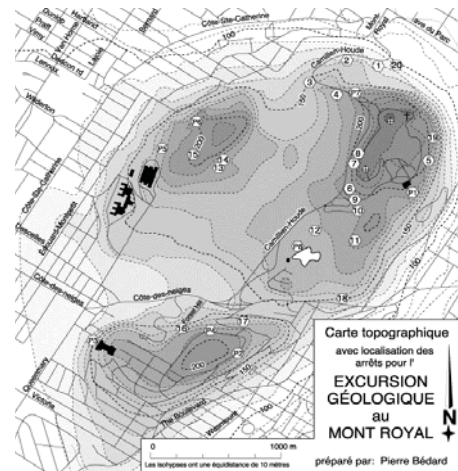


Figure 0.6: Carte topographique du Mont Royal. Source : [http://www.unites.uqam.ca/~sct/mont-Royal/excursion\\_mt-royal.html](http://www.unites.uqam.ca/~sct/mont-Royal/excursion_mt-royal.html) consulté le 22/02/05

La force de la méthode proposée est de permettre une analyse des situations météorologiques sous différents points de vue. Dans un premier temps, la circulation synoptique est révélée par les types de temps qui offrent un aperçu des conditions météorologiques d'échelle régionale. Elle permet de distinguer les grands systèmes les uns des autres de même que leur déplacement au-dessus de la grande région Montréalaise. Dans une seconde étape, le MRCC offre la possibilité d'utiliser les principes fondamentaux de la physique de l'atmosphère et des particules aéroportées, dans le but de développer un outil complémentaire aux méthodes précédentes. Ces principes sont à la base des modèles mathématiques extrêmement complexes auxquels le MRCC appartient. Les méthodes numériques sur ordinateurs permettent de résoudre les équations de la dynamique des fluides sans contraintes pour une vaste gamme d'échelles spatiales et pour un bon nombre de types d'écoulements. Le MRCC est à la fine pointe de la recherche actuelle. Le développement de tels modèles climatiques régionaux est le résultat de l'intégration à sens unique de modèles à domaines limités, les LAM (Limited Area Model) à des modèles de la circulation générale de l'atmosphère, les MCG, dans le but d'affiner l'échelle spatiale et ceci en vue de simuler le climat dans un domaine plus limité. Le MRCC a vu le jour il y a une quinzaine d'années. Laprise (1990) envisage alors d'utiliser le noyau dynamique, basé sur les équations du champ d'Euler (Tanguay et al., 1990) du modèle méso échelle compressible communautaire,

MC2, mis au point par Robert et ses collègues au Centre coopératif de recherche de méso échelle (CCRM) (Laprise *et al.*, 1997), comme point de départ de la conception de ce modèle. Le noyau dynamique semi-lagrangien et semi-implicite de MC2 est alors couplé à l'ensemble de la paramétrisation des processus physiques de MCG (McFarlane *et al.*, 1992) afin de produire le MRCC dont un prototype est mis sur pied entre 1991 et 1994 et publié par Caya *et al.* (1999). Etant donné que MC2 est un modèle régional, les conditions aux limites inférieures et latérales doivent être spécifiées. Il s'agit de la procédure par « emboîtement ». Dans son domaine, le MRCC peut prendre en charge ses propres structures fines. Cette procédure a été testée avec succès au-dessus d'un milieu alpin fortement perturbé (Goyette *et al.*, 2003, 2001). Des simulations à long terme ont par ailleurs été réalisées au-dessus de l'Ouest Canadien avec une résolution de 45 km (Laprise *et al.*, 1998).

L'intérêt de la modélisation numérique est d'être complémentaire à la prise de données sur le terrain car une fois validée, elle offre une image tridimensionnelle de l'évolution spatio-temporelle du nuage pollinique au-dessus d'une région donnée. L'objectif est de parvenir à déterminer l'influence des différentes conditions atmosphériques sur les principales étapes de la trajectoire aérobiologique simulée, c'est-à-dire les conditions d'émission, de transport et d'élimination du pollen. Seule l'utilisation d'un modèle atmosphérique à haute résolution peut offrir la possibilité d'évaluer ces différentes composantes. Le domaine au-dessus duquel on effectue la simulation se voit attribuer une grille dont la taille dépend de l'échelle de la région à l'étude et de la résolution à laquelle on souhaite résoudre un problème en particulier. Nous sommes ainsi, à l'heure actuelle, en mesure d'obtenir des informations polliniques et météorologiques à tous les kilomètres sur une grille de 60 X 60 km centrée sur Montréal, comprenant 25 niveaux dans la verticale (entre 1000 mb et 500 mb) sauvegardées toutes les 15 minutes. Chaque nœud de calcul est localisable dans l'espace grâce à ses coordonnées géographiques, ce qui rend possible la comparaison entre l'observation et la simulation. Il est dans ce cas possible d'extraire des coupes verticales de l'ensemble des paramètres étudiés pour un temps donné et d'en regarder l'évolution temporelle en cumulant des profils verticaux issus du même point mais en suivant une échelle temporelle. Il est également possible d'extraire sur des quartiers ou portions de territoires des profils pour un temps donné entre deux points de l'île pour chacun des paramètres. Dans ce cas, il s'agit de mettre en évidence des gradients de concentrations polliniques d'un point de mesure à un autre et ainsi de suite.

La recherche en aérobiologie est sans nul doute arrivée à un point où elle doit désormais s'efforcer d'intégrer dans son approche autant que faire ce peut, les phénomènes

climatiques, météorologiques, phénologiques et polliniques en vue d'améliorer la précision des prévisions (Kennedy, 1997). En effet, l'ensemble des chiffres avancés un peu partout dans le monde, tant en terme de personnes affectées par l'allergie respiratoire qu'en celui de coûts directs et indirects mais aussi en terme d'évolution dans le temps, laisse présumer de conditions d'avenir peu encourageantes. Lacey (1991) précise que l'on doit tenir compte autant des espèces concernées que des conditions atmosphériques et environnementales au moment de l'exposition, de la durée et enfin du « terrain immunologique favorable ou non » du patient. L'inquiétude actuelle et manifeste des milieux de la santé vient de l'observation de corrélations significatives entre ces symptômes et le taux croissant d'allergènes dans l'air ambiant (supplément du Médecin du Québec, 1994). Même si le rôle de la pollution vis-à-vis des allergies respiratoires demeure controversé (Liccardi *et al.*, 2001), il est clair que les polluants contribuent au moins à une augmentation des symptômes observés au cours des 10 dernières années. Ils sont des irritants des voies respiratoires, ce qui a pour effet d'entraîner à la fois des dommages chroniques de celles-ci et de favoriser la sensibilisation de certains individus plus vulnérables à certains allergènes aéroportés (D'Amato, 2002). Par ailleurs dans un contexte de changements climatiques, on peut s'attendre à ce que la conjonction de printemps plus précoces associés à un allongement probable de la saison de croissance et une augmentation du CO<sub>2</sub> vont affecter les plantes, la quantité de biomasse produite, leur développement et potentiellement leur capacité à produire plus de pollen. Wayne (2002) signale qu'il faut également considérer le fait que les paramètres météorologiques tels, la température et les précipitations, seront eux-mêmes influencés par ces changements et influenceront en retour la croissance et la distribution de l'ambrosie. Le Département de l'Agriculture des Etats Unis<sup>3</sup> annonce en 2000 que du fait de l'augmentation récente observée des concentrations de dioxyde de carbone, la production de pollen d'ambrosie qui a augmenté au cours des cinquante dernières années, risque de doubler de nouveau d'ici la fin du siècle actuel (Figure 0.7).

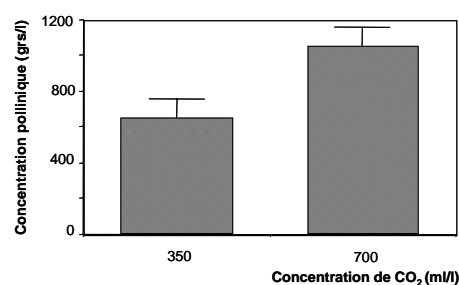


Figure 0.7 : Production de pollen d'ambrosie et concentration en CO<sub>2</sub>. Adapté de Wayne *et al.*, 2002

Tant du point de vue des conditions favorisant une

pollution de l'air accrue que des changements climatiques renforcés par l'îlot de chaleur urbain qui ont déjà et vont continuer d'avoir des effets irrémédiables sur la production d'aéro allergènes (Ziska et *al.*, 2003) donc sur la santé publique et notamment celle des enfants (Epstein et *al.*, 2004), les villes sont désormais des lieux particulièrement en danger. Une telle situation laisse craindre le pire pour l'avenir de la santé des populations urbaines vulnérables d'autant que la part de la population mondiale urbaine ne cesse d'augmenter. Il y a moins de 500 ans, moins de 30% de la population mondiale vivait en ville. Selon les experts de l'Organisation des Nations Unies (ONU) 47% de la population mondiale vivait dans les villes en 2000. D'ici 2008, plus de moitié sera urbaine et plus de 61% d'ici 2030 (Reuters, 03/2005) dont les  $\frac{3}{4}$  dans les pays en voie de développement. Chaque jour, près de 180.000 personnes viennent accroître la population urbaine<sup>4</sup>. Ce constat est vraiment peu encourageant. Dans le même temps, ce milieu est devenu un excellent laboratoire d'étude des conditions futures d'un climat en changement. Les transformations globales du climat auront probablement un impact sur la durée des saisons, leur précocité, la longueur de la saison de croissance, les quantités de pollen émises (Epstein et *al.*, 2004 ; Sziska et *al.*, 2003, Gebhard et *al.*, 2002 ; Wayne et *al.*, 2002) et peut être même sur le degré d'allergénicité desdits pollens. La plante quant à elle tend à étendre son aire de distribution (Emberlin, 1994 dans Beggs, 2004) sous l'effet de conditions plus chaudes de même qu'une plus grande persistance annuelle de la plante.

L'ensemble de ces arguments nous amène à penser qu'il est devenu urgent d'obtenir une meilleure connaissance, plus approfondie, des différentes phases de la trajectoire aérobiologique et plus particulièrement du transport donc par conséquent de la pluie pollinique au-dessus d'une région, urbaine de surcroît. Il est devenu indispensable de comprendre comment ce pollen se déplace dans le temps et dans l'espace. La modélisation numérique peut ouvrir cette porte vers une amélioration de la connaissance du comportement du nuage de pollen pouvant mener à plus ou moins long terme à une prévision fiable des risques encourus par une population donnée, dans une région déterminée. Le MRCC apparaît alors comme étant un outil d'avenir à développer dans ce sens même si aujourd'hui encore un certain nombre d'inconnues ou d'imprécisions demeurent notamment en ce qui concerne la localisation des sources et l'intégration de la phénologie de la plante. Ce présent travail souhaite contribuer à une nouvelle étape décisive pour l'aérobiologie en proposant une méthodologie apte à intégrer un plus grand nombre de paramètres influençant la dispersion du pollen à différents niveaux de résolution spatiale. La démarche que nous proposons dans la suite de cet exposé se veut originale et complémentaire de celles actuellement disponibles et dont un certain nombre sont citées dans le chapitre 1.



---

## CHAPITRE 1 – ÉTAT DES CONNAISSANCES

*Ce chapitre a pour objectif de présenter l'ambrosie en tant que plante mais aussi et surtout en tant qu'allergène par le biais du pollen qu'elle émet dans l'environnement atmosphérique en quantités très abondantes en fin d'été. Cette plante largement étudiée dans la région de Montréal, terrain d'étude de cette recherche mais aussi ailleurs dans le monde où elle s'installe petit à petit, fait l'objet d'une littérature abondante et diversifiée. Nous déterminons dans un premier temps, ses rythmes de même que les caractéristiques qui en font une plante à haut risque pour la santé et qui sur ce plan, contribue majoritairement aux allergies respiratoires identifiées parmi plus 10% de la population montréalaise de fin d'été. La seconde section de ce chapitre se concentre sur la trajectoire aérobiologique. Du fait de son trajet aérien, depuis une source jusqu'à un récepteur, le pollen est soumis à l'influence directe des conditions météorologiques expérimentées durant ce parcours. Les paramètres qui caractérisent le temps interviennent à divers degrés à l'occasion de chacune des étapes de cette trajectoire, à savoir en influençant l'émission, en favorisant ou en limitant le transport et la dispersion ainsi qu'en accélérant ou non la déposition. La plupart de ces effets se produisent dans les plus bas niveaux de l'atmosphère communément appelée la couche limite atmosphérique. Cette région de l'atmosphère en contact direct avec la surface terrestre, présente des conditions spécifiques qui en font entre autre une couche turbulente, caractère particulièrement déterminant du devenir du pollen dans l'air. Vue l'importance de la couche limite atmosphérique et des paramètres météorologiques qui la composent, une attention particulière est accordée à ceux-ci et à leurs effets potentiels sur la charge pollinique. Enfin, l'objet de cette recherche étant d'étudier le comportement du nuage de pollen au-dessus de la grande région de Montréal, la dernière section aborde les techniques de mesure et d'évaluation, les approches statistiques et déterministes déjà testées et publiées à propos de l'ambrosie ou de tout autre type de pollens, de manière à introduire la double approche ici proposée et dont chacune fait l'objet d'un prochain chapitre.*

---



## CHAPITRE 1

L'ambrosie est responsable de la principale cause de rhinite allergique saisonnière en Amérique du Nord, affectant au moins 10 % de la population (Basset *et al.*, 1977, 1975). Déjà en 1931, Durham estimait qu'environ 90% du pollen de fin d'été provenait de cette plante ainsi que de la grande herbe à poux. Du fait de son caractère hyper allergène et des ennuis qu'elle suscite aux populations locales, cette plante est largement étudiée, ce qui confirme l'imposante littérature disponible à son égard. Elle est aussi d'autant plus intéressante qu'elle possède des caractéristiques intrinsèques liées à sa physiologie qui la rendent virulente tant du point de vue de ses capacités d'envahissement et d'adaptation à de nouveaux espaces que de sa vitesse d'implantation sur ces nouveaux sites (caractère rudéral), grâce notamment à sa propension à produire des quantités innombrables de pollen et de graines. Selon Comtois et Gagnon (1990) le pollen de l'ambrosie contribue pour plus de tiers du pollen total qui se dépose chaque année au Sud du Québec soit plus de 100 kg pour l'île de Montréal. Le pollen de la petite et celui de la grande herbe à poux compte pour 25 à 35% de la pluie pollinique Montréalaise (Durand, 1986) et contribue à plus de 60% des symptômes d'allergie respiratoire (Comtois *et al.*, 1988). Elle constitue à Montréal la troisième et dernière des principales saisons récurrentes d'allergie. Avec le bouleau, le pin et les graminées indigènes, l'ambrosie compte d'après Gagnon (1989) pour 61 à 67% de la spora pollinique collectée sur le ruban des échantillonneurs Burkard<sup>1</sup> (Annexe 2.1).

Considérant la distribution et la variété de la végétation au sein d'un territoire, il faut savoir qu'elle est largement influencée par les caractéristiques physiques de ladite région mais aussi par l'intervention humaine (Asselin *et al.*, 1998). Étant donné que l'être humain génère par sa gestion de l'environnement les conditions favorables au développement de ce type de plante, il peut être lui-même considéré comme étant en partie tout au moins le précurseur des symptômes d'allergie dont il souffre (Wodehouse, 1939). Le climat est évidemment un autre élément déterminant de la biogéographie d'une région. De ce fait, facteurs climatologiques et météorologiques interviennent et modulent les différentes étapes de la trajectoire aérobiologique du pollen. Au cours de la phase du développement de la plante qui conditionne sa croissance et donc la saison pollinique suivante, la température joue *a priori* un rôle significatif, déterminant

la plus ou moins grande précocité de la saison pollinique ainsi que sa durée, elle-même relative à cet avancement ou retard. L'ensoleillement est également un critère important de cette phase pré pollinique. Il détermine entre autre la quantité de chaleur que la plante reçoit. La pluie printanière est quant à elle déterminante du début et de l'allure de la saison pollinique à suivre. Elle est nécessaire à la plante pendant ses phases de croissance et de floraison. Une fois la plante à maturité, des paramètres tels que l'humidité relative, la température de l'air et l'ensoleillement sont déterminants de la phase d'émission du pollen. Ils le demeurent également au cours de l'étape suivante qui concerne son déplacement dans l'air. Ajoutons de nouveaux paramètres déterminants : le régime du vent tant dans sa force que dans sa provenance ainsi que la structure verticale de la basse atmosphère qui détermine son degré de stabilité. Enfin, la dernière phase de la trajectoire, l'élimination du pollen, est principalement caractérisée par les conditions d'humidité et de précipitations.

Le but de ce travail est d'étudier en détail la partie centrale du cycle de la pollinisation de l'ambrosie à Montréal, c'est-à-dire celle concernant le transport, soit le déplacement du nuage en espérant ultimement, à plus ou moins long terme, arriver à une meilleure prévision des risques d'allergie et donc une meilleure information de la population sensible. De nombreux travaux ont déjà été menés dans ce champ de l'aérobiologie qui vont être maintenant présentés afin d'introduire cette recherche en rapport avec ce qui est déjà su. Les différents aspects liés à la pollinisation (période, durée, quantité, rythme circadien) seront ainsi abordés. Une fois le pollen libéré, nous accorderons une importance aux effets de ces pollens sur la santé en abordant la question des risques ainsi qu'en dressant un tableau de la situation québécoise et montréalaise. Les effets des paramètres météorologiques sur les différentes étapes de sa trajectoire aérobiologique seront ensuite décrits. Il se peut que l'on fasse parfois état de travaux n'ayant pas exclusivement trait à l'ambrosie mais dont les conclusions sont tout à fait valables pour cette recherche. Une dernière section abordera enfin la question de la modélisation. Seront distinguées la modélisation statistique qui est en fait la résultante d'études empiriques, de la modélisation numérique dont nous trouvons désormais aussi quelques expériences relatives à l'aérobiologie, disponibles dans la littérature.

<sup>1</sup> Site internet de la trappe volumétrique 7 jours de chez Burkard, consulté le 29.09.05: [http://www.burkardscientific.co.uk/Agronomics/Agronomics\\_Product\\_Spore\\_sampler.htm](http://www.burkardscientific.co.uk/Agronomics/Agronomics_Product_Spore_sampler.htm)

Le modèle employé, le MRCC, entre dans cette catégorie. Sa description détaillée sera présentée dans le chapitre 3.

### 1. Ambroisie : plante, pollen et risque

Cette section propose une description de la plante, de ses besoins, de son aire de distribution mondiale et des risques qu'elle fait encourir à la population.

#### 1.1. Ambroisie : description, distribution et rythmes

Les fleurs qui utilisent le vent comme mode de dispersion de leurs pollens telles l'ambroisie sont d'aspect généralement peu attractif : ternes, discrètes, peu odorantes, sans nectar et unisexuées. Etant donné la très faible probabilité pour un pollen aéroporté d'atteindre sa cible soit un stigmate de quelques mm seulement, il s'en suit une autre caractéristique qui est celle de produire du pollen en très grandes quantités de manière à augmenter les chances de succès, succès rimant avec pollinisation (Comtois et Gagnon, 1990). Le gaspillage est donc énorme même sur courte distance. Un seul plant d'ambroisie peut produire jusqu'à 2.5 milliards de grains.

#### i. Notions de physiologie végétale

La plante étudiée se dénomme ambroisie<sup>2</sup> à feuilles d'armoise (*Ambrosia artemisiifolia* L.) du fait de la ressemblance de ses feuilles matures à celles de l'armoise vulgaire (*Artemisia vulgaris* L.). Des photographies de l'ambroisie et de son pollen sont disponibles en Annexe 1.1. Elle appartient à la famille des astéracées (composées tubuliflores) au même titre que le chrysanthème ou le tournesol et est la plus importante des trois espèces d'ambroisie que l'on trouve au Québec (Vincent, 1990). Il s'agit d'une herbacée annuelle pouvant atteindre plus de 1 mètre de haut présentant une tige dressée et poilue. Une description détaillée de la plante est également présentée en Annexe 1.1. Le fait qu'elle soit annuelle signifie que l'ensemble de son cycle, de la graine à la graine, se déroule sur une seule saison. La germination des graines est printanière, ce qui en fait selon Delabays *et al.* (2002) une adventice des cultures de printemps. Son cycle physiologique est bien illustré dans le Tableau 1.1.

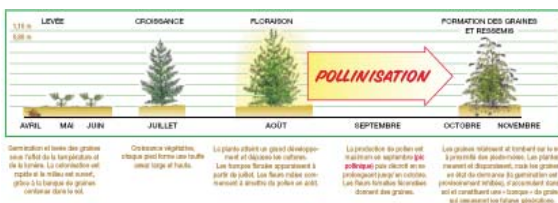


Tableau 1.1 : Développement de la plante. [http://www.rhone-alpes.sante.gouv.fr/sante/environn/acrobat/ambroi\\_1.pdf](http://www.rhone-alpes.sante.gouv.fr/sante/environn/acrobat/ambroi_1.pdf)

Il a pu être noté par Dickerson et Sweet (1971) une décroissance selon un gradient Nord-Sud en Amérique du Nord (Tableau 1.2) de la maturité des inflorescences directement corrélée à une augmentation du développement végétatif tel que mesuré par la hauteur des plants de même que les poids frais et secs de la biomasse. Sa productivité ne semble pas augmenter pour autant plus au Sud. Les auteurs concluent que les écotypes de l'ambroisie sont génétiquement adaptés à la longueur du jour de la région dans laquelle ils sont installés.

Source of seed	North lat. degree	Height cm	Fresh weight g	Dry weight g	Inflorescence ratings*			
					July 31		Sept 20 and 26	
					Stamin	Pistil	Stamin	Pistil
Proser, Washington.....	46.1	88	834	307	4.5	0.2	10.0	10.0
Orono, Maine.....	44.8	75	1037	345	4.9	0.2	10.0	10.0
Durham, New Hampshire.....	43.1	76	822	294	4.8	0.7	9.8	10.0
London, Ontario.....	42.9	85	1003	318	3.9	0.2	10.0	10.0
Freeville, New York.....	42.5	82	1173	391	2.5	0.0	10.0	10.0
Ithaca, New York.....	42.4	81	1029	347	3.2	0.0	10.0	10.0
University Park, Pennsylvania.....	40.7	90	1444	445	2.6	0.0	10.0	10.0
Lafayette, Indiana.....	40.3	109	1388	457	1.0	0.0	10.0	9.9
Morgantown, West Virginia.....	39.6	113	1796	531	1.5	0.0	10.0	10.0
Minnetonka, Minnesota.....	39.3	112	2214	632	0.2	0.0	9.8	9.3
Painesville, Virginia.....	37.5	145	2511	625	0.0	0.0	5.2	5.2
Belle Glade, Florida.....	26.7	179	3707	873	0.0	0.0	3.2	2.3
LSD: 05.....	11	417	111	0.9	0.3	0.7	0.7	0.8
01.....	14	549	145	1.2	0.4	0.9	1.1	

\*0 = no visible inflorescences; 5 = visible staminate heads on 75% of the branches; also 5 = visible flowers without seed in 75% of the axils; 10 = staminate inflorescences on nearly all branches; also 10 = well developed seed in nearly every axil.

Tableau 1.2 : Gradient Nord-Sud. D'après Dickerson et Sweet, 1971

En effet, comme l'ont montré Garner *et al.*, (1920), suite à une étude extensive menée sur les écotypes du Maryland, l'ambroisie est une plante de « jours courts ». De ce fait, trop de clarté durant la saison de pollinisation peut jouer en défaveur de la production du pollen. Selon Buck et Levetin (1982) l'anthèse se produit lorsque les jours raccourcissent en durée. Les plantes des latitudes plus méridionales, nécessitent des journées plus courtes pour atteindre le même stade de reproduction que celles des latitudes plus nordiques. Comtois *et al.*, (1990) vérifient ce phénomène à Montréal où ils observent une gradation du Nord vers le Sud des dates de l'anthèse (éclosion des fleurs). L'ambroisie fleurit quelques jours plus tôt à Québec qu'à Montréal et ainsi de suite plus on se déplace vers le Sud. Toutefois, si c'est la longueur du jour qui détermine la position de la saison pollinique de l'ambroisie dans l'année pour une région donnée (Solomon, 1979), c'est la vitesse de sommation des degrés jours de croissance (totalisation des températures moyennes au-dessus d'un seuil défini) qui en détermine les fluctuations inter annuelles ainsi que la variabilité spatiale de la déposition pollinique au Québec méridional comme le montrent Comtois *et al.* (1990). Il semble aussi que les quantités de pollen produites par la plante soient corrélées positivement avec les températures estivales (Comtois *et al.*, 1988). Lieth (1974) a déterminé le seuil de 5°C comme étant significatif de la détermination des principales phéno phases sous le climat du Québec. La somme de 1280°C au-dessus de 5°C semble aussi être selon Comtois *et al.* (1989) l'indice le plus stable permettant de déterminer la semaine du début de la pollinisation de l'ambroisie à Montréal. Cette valeur de plus de 1200°C degrés jours de croissance est confirmée par Makra *et al.* (2004) en Hongrie qui précise que dans certaines régions du monde, lorsque cette valeur n'est pas atteinte, rien n'empêche de trouver quelques plants épars

<sup>2</sup> Synonymes possibles: Absinthe du pays, Absinthe du Canada, Herbe de la Saint-Jean, Herbe de Garga, Herbe de ère Lègre, Herbe de Saignieu, Herbe de Bonce, Herbe de Saint-Prim, Fausse tomate, Fausse moutarde, Herbe à poux... Selon un dossier d'information, guide méthodologique en région Rhône-Alpes traitant de la lutte contre l'ambroisie (2000) (<http://www.rhone-alpes.sante.gouv.fr>)



d'ambrosie mais la population ne peut se développer au point de devenir néfaste. Laaidi *et al.* (1997) rappellent par ailleurs que parmi les facteurs qui influencent la maturation de la plante, l'ensoleillement contribue à conditionner les températures certes mais est aussi indispensable au développement des bourgeons floraux et que par ailleurs les précipitations doivent aussi être relativement abondantes au cours du printemps. Dans cette mesure-là, on peut bien admettre que même si les conditions anthropiques sont réunies pour l'installation de la plante (Annexe 1.1), les facteurs limitants sont d'ordre purement climatique (Comtois, 1998).

C'est à partir de l'émission de pollen par les premières fleurs dans l'air que les personnes allergiques ressentent les premiers symptômes. Le diamètre de ce pollen varie entre 18 et 30  $\mu\text{m}$  en moyenne. Il est tricolporé et hérissé d'épines. Un gramme de pollen contiendrait 90 millions de grains de pollen ([www.rhone-alpes.sante.gouv.fr](http://www.rhone-alpes.sante.gouv.fr)). Les concentrations les plus élevées de pollen d'ambrosie (>100 grains/ $\text{m}^3$  d'air) sont mesurées en août de chaque année à Montréal. D'après Comtois et Sherknies (1992) il y domine la spora atmosphérique urbaine pendant environ 6 semaines par an. Par ailleurs, sa capacité de transport éolien est grande du fait de son très faible poids, qui lui permet de parcourir plusieurs centaines de kilomètres (Raynor *et al.*, 1970).

## ii. Distribution géographique

Originnaire d'Amérique, l'ambrosie à feuilles d'armoïse compte au Québec parmi les 4 espèces d'ambrosies présentes au Canada (Vincent, 1990). Avec la grande ambrosie (*Ambrosia psilostachya* D. C.) et l'ambrosie vivace (*Ambrosia trifida* L.) (Figure 1.1 a et b). Il existe une quatrième espèce dénommée « bur-ragweed » (*Ambrosia avanthicarpa* Hook.) mais que l'on ne rencontre que sporadiquement sur les dunes de sable du Sud de l'Alberta et de la Saskatchewan. Les 3 autres présentent pratiquement la même aire de distribution, soit dans à peu près toutes les provinces canadiennes. Toutefois l'ambrosie à feuille d'armoïse est particulièrement bien installée dans l'Est du pays au même titre que la grande ambrosie (*Ambrosia trifida* L.). Elle a considérablement accru son aire de distribution à la faveur du défrichement. La vallée du Saint-Laurent correspond à une zone où les populations d'ambrosie sont particulièrement denses. Au Nord et dans l'Est la plante se fait moins envahissante ou disparaît complètement. Mandeville (1995) rapporte qu'elle est cependant en voie de coloniser de nouveau un territoire dont elle avait été totalement éradiquée : la Gaspésie. Elle jalonne de nouveau les routes principales de la péninsule.



Figure 1.1 : Représentations d'*ambrosia artemisiifolia* (a) et *ambrosia trifida* (b). Source: <http://caliban.mpiz-koeln.mpg.de/~stueber/tindman/533.jpg>

Plus récemment, en 1992, une cartographie réalisée à partir d'images de télédétection a permis de distinguer dans la région métropolitaine de Montréal que 13.5% de ce territoire était composé de surfaces boisées et de végétation arborescente. Les surfaces herbacées incluant les gazons et la production céréalière représentent 20% des surfaces des municipalités par rapport à l'utilisation du sol. Une carte de distribution de l'ambrosie (Néron, 2002) est disponible pour le Sud du Québec (Figure 1.2). Elle permet de visualiser la portion du territoire québécois occupée par la plante. On arrive à distinguer trois zones d'importance dans lesquelles l'espèce peut être soit abondante, soit fréquente mais peu envahissante ou rare ou encore absente. Au Québec, elle se situe à la limite de son aire de distribution (Bouchard, 2002) et on la retrouve dans la majorité des terrains agricoles situés au Sud du 48<sup>ième</sup> parallèle (rapporté par Vincent, 1990). Sa distribution dans le reste du monde est présentée en Annexe 1.1. La présence de l'ambrosie représente une réelle plaie partout où elle s'installe. Comme on peut le voir son aire de distribution s'étend dans le monde depuis le dernier siècle, résultant du commerce des céréalicultures puis des conditions de gestion anthropique inadéquate et enfin des conditions climatiques qui favorisent la croissance de la plante. Le problème est en train de devenir planétaire.

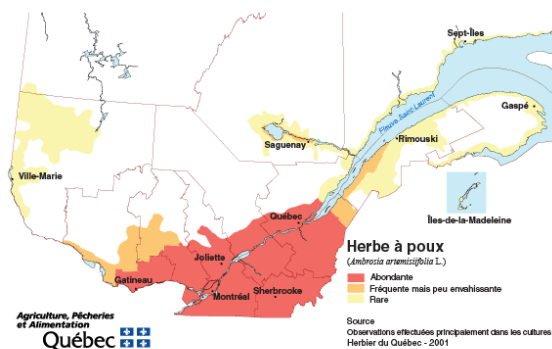


Figure 1.2 : Carte de distribution de l'ambrosie au Québec. D'après Néron, 2002

### iii. Saison pollinique et journée type

Dans le cas des plantes annuelles et anémophiles, l'émission du pollen correspond au stade reproductif de leur cycle de vie. Il précède la sénescence suivie de la mort de la plante. La maturité végétative est atteinte au début de l'été lorsque l'énergie solaire quotidienne disponible pour la photosynthèse est à son maximum. Aussitôt que cette quantité d'énergie solaire disponible diminue, les ressources qui ont été préalablement stockées dans les racines et les feuilles les plus basses sont utilisées pour l'émergence de bourgeons floraux. Le développement de ces bourgeons floraux primaires commence lorsque la période de noirceur quotidienne atteint une longueur critique qui diffère d'une espèce à une autre (Edmonds, 1979). Courant juillet et août, très peu d'événements climatiques peuvent réellement empêcher la croissance de la plante. C'est pourquoi, le développement et la libération du pollen de même que la production ultérieure des graines sont des phénomènes qui se produisent avec une relativement bonne régularité. Dans la région de Montréal, les graines de l'ambrosie germent vers la mi-mai. La croissance de la plante se poursuit tout l'été et arrive généralement à maturité vers la mi-août, période à laquelle s'épanouissent les fleurs mâles. L'éclosion des premières fleurs marque le début de la saison pollinique. A Montréal, le laboratoire d'aérobiologie de l'Université de Montréal a fixé le début de la saison lorsque l'on trouve 1 grain de ce pollen/m<sup>3</sup> d'air pendant 3 jours à suivre. Il a par ailleurs été noté qu'entre 1985 et 1987 que cette date d'initiation semblait de plus en plus précoce (Comtois, 1990).

L'ambrosie compte parmi le groupe des herbacées, annuelles, qui émettent leur pollen en fin d'été – début d'automne, soit en fin de saison de croissance à Montréal. Cette période commence donc plus ou moins progressivement à la mi-août voire plus tôt selon les années. Plus la saison avance, plus le nombre de grains/m<sup>3</sup> d'air mesuré augmente pour atteindre un ou des maxima à la fin août puis diminuer graduellement jusqu'aux

premières gelées début octobre. L'anthèse dure environ 6 semaines. Farnham *et al.* (1989) observent la répétition d'année en année d'une relative similarité entre les saisons polliniques d'ambrosie ce qui les amène à proposer une décomposition arbitraire de celle-ci selon 4 phases. La première, l'initiation, apparaît avec les premiers grains de pollen jusqu'au pic majeur de pollen. Cette phase est ensuite suivie du plateau qui s'étire jusqu'au dernier jour de la saison durant lequel on atteint au moins 30 grains de pollen par m<sup>3</sup> d'air. Puis suit la phase terminale qu'ils ont définie comme finissant avec le premier jour atteignant 10 grains/m<sup>3</sup> d'air. Finalement, la queue englobe les dernières journées jusqu'à ce que l'on trouve 3 jours consécutifs sans ambrosie (Figure 1.3). Cette séquence est assez précise du fait de la synchronisation avec la longueur de la nuit.

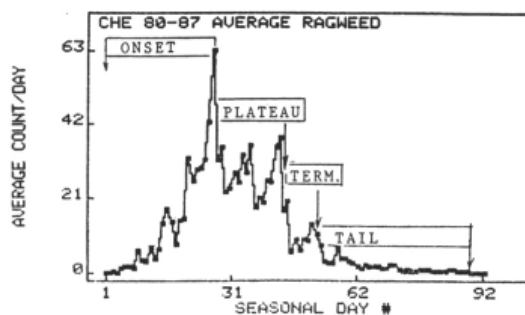


Figure 1.3 : Description de la saison pollinique de l'ambrosie selon Farnham, 1989

Afin de déterminer le cycle diurne de la production du pollen d'ambrosie, Ogden et Hayes (1969) ont placé un capteur de pollen de type trappe Hirst dans un champs d'ambrosie de manière à éviter tout doute tant sur la source que le temps de transport du pollen (Figure 1.4). Peu de chercheurs avaient auparavant étudié l'émission à proximité d'une source. Parmi eux Jones en 1952 s'était préalablement intéressé au cas d'*A. trifida* et *A. psilostachya* pour laquelle il avait mis à jour la principale période d'émission entre 07 :00 et 13 :00. Dans le cas d'*A. trifida*, 80% du total était émis entre 08 :00 et 11 :00 avec un pic à 09 :00 à Lincoln (Nebraska) en 1945 et 95% du total entre 07 :00 et 10 :30 avec un pic à 07 :30 à Stillwater (Oklahoma) en 1946. Concernant *A. psilostachya*, le pic a eu lieu à 08 :30 en 1946 avec 90% de la production journalière entre 07 :00 et 10 :00. Bianchi et ses collaborateurs (1959) observent sur le terrain une périodicité diurne bien définie pour l'ambrosie. Selon leurs observations l'anthèse se produit entre 06 :30 et 08 :00 du matin. Comme le graphique de la Figure 1.5 le montre, cet « événement » peut avoir lieu de façon abrupte ou plus progressivement. Holmes et Basset (1963) font le même type d'expérience à Ottawa cette fois-ci sur une période de 30 jours. Ils trouvent que le pic peut avoir lieu de 06 :00 - 07 :00 à 13 :00 - 14 :00 avec une plus grande occurrence entre 09 :00 et 10 :00. Ils montrent aussi que

lors d'une journée typique de pollinisation d'ambrosie, les comptes polliniques augmentent très rapidement tôt le matin en même temps que baisse l'humidité relative. De plus ils mettent en relation les variations quotidiennes des concentrations avec les conditions météorologiques et associent de façon directe les maximums avec des périodes de turbulence intense. Selon Fishbach (1986) dans le Wisconsin, 45% de l'émission quotidienne du pollen a lieu avant midi, entre le lever du soleil et midi ; 75% sont émis avant 18 :00 heures et l'autre partie pendant la fin de la journée, jusqu'au prochain levé du jour (Figure 1.5). Dans la région lyonnaise, Thibaudon (1992) distingue deux tranches horaires englobant les maxima soit 09 :00 -11 :00 dans  $\frac{3}{4}$  des années étudiées et 11 :00 -13 :00 dans un autre cas.

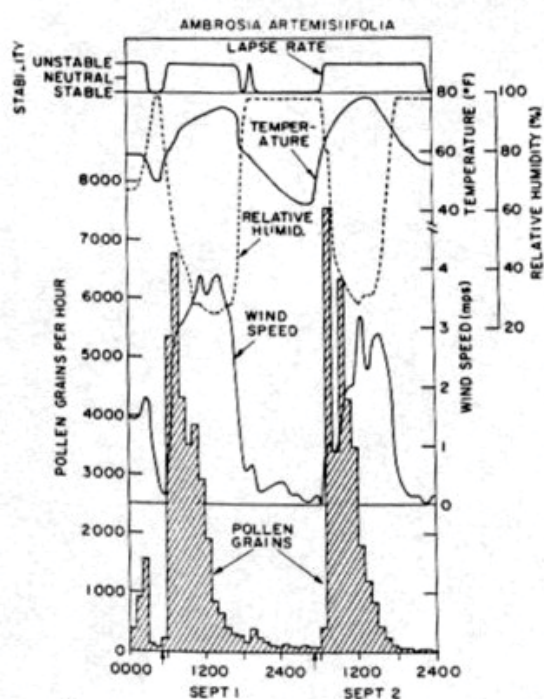


Figure 1.4: Variation des quantités horaires moyennes de pollen d'ambrosie sous l'effet des conditions atmosphériques (vitesse du vent, température, humidité relative et stabilité atmosphérique) les 1 et 2 septembre 1963. D'après Ogden et al., 1969

L'émission normale du pollen d'ambrosie commence une ou deux heures après le lever du soleil, le pic a lieu quelques heures plus tard et les concentrations diminuent au cours de l'après midi. Il se peut cependant que si les conditions atmosphériques de fin de nuit sont favorables, le pollen soit prêt plus hâtivement à être émis (Ogden et al., 1969). Dans tous les cas, le moment le plus marqué de l'émission est fortement corrélé à une augmentation de la température et une diminution de l'humidité relative (Figure 1.4) ainsi qu'à une augmentation subite de la quantité de radiation solaire qui atteint les plants. Ce dernier paramètre est très probablement la cause des deux précédents (Bianchi et al., 1959). En effet, en plaçant des

plants d'ambrosie à 4°C durant une nuit entière puis en les forçant en les plaçant à des températures inversement fortes, l'effet était tout à fait inhibé. Le taux d'ouverture des fleurs est dépendant à la fois de la température des 24 heures précédant la floraison mais aussi de celle à laquelle sont ensuite soumis les plants en seconde exposition. Le même type d'expérience a aussi été effectué afin d'estimer l'effet de l'humidité relative sur la préparation des fleurs à libérer leur pollen. Placés sous atmosphère contrôlée, les plants soumis à une HR de 20% voient 50% de leurs fleurs écloses au bout de 53 min alors qu'à 60%, la moitié l'est en seulement 123 min. A 80%, aucune fleur n'était prête après 3 heures. Toutefois si l'on fait basculer ce contenu en humidité de 80 à 15% alors, le pollen est libéré en seulement 30 min. Ils ont ainsi pu établir que l'émission du pollen d'ambrosie ou la vitesse à laquelle a lieu l'anthèse est inversement proportionnelle à l'humidité relative et directement proportionnelle à la température de l'air. L'étude de l'effet de l'éclairage n'a pas laissé entrevoir de relation avec la libération du pollen ; rien ne change, ni en terme de quantité de fleurs qui s'ouvrent, ni en terme de rythme de la périodicité. Ils concluent que la température est déterminante du contrôle de l'extension des sacs polliniques et que le rôle de l'humidité relative se fait essentiellement sentir au niveau de l'ouverture de ces sacs (Bianchi et al., 1959).

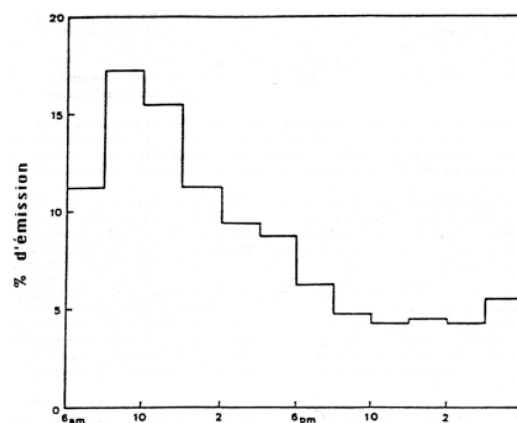


Figure 1.5: Journée type d'émission d'ambrosia artemisiifolia L., adapté de Fishbach, 1986

Si la période de libération du pollen ainsi que les quantités sont le résultat d'une adaptation génétiquement contrôlée de la plante à son milieu, l'émission et la diffusion demeurent toutefois conditionnées par les facteurs météorologiques dont on peut simplifier les effets de la façon suivante. Il y a les facteurs limitants qui favorisent le lessivage de l'air soit en empêchant le pollen de quitter les fleurs soit en l'éliminant une fois dans l'atmosphère. Il s'agit de la fraîcheur et de l'humidité voire les précipitations. Et puis il y a les facteurs qui favorisent l'émission, c'est-à-dire ceux qui caractérisent le temps sec légèrement venteux.



## 1.2. Allergie et risque

### i. Critères de flottabilité, abondance et toxicité

Afin de juger de l'importance clinique d'un pollen, plusieurs critères ont été proposés par Thommen (1930,1931). Ces derniers ont été reconsidérés en 1945 par Wodehouse qui stipule que pour déterminer une spora locale comme étant allergène, elle doit répondre à trois critères principaux, la flottabilité, l'abondance et le degré de toxicité allergénique des micro-organismes en question. Il n'est guère difficile de convenir du critère de flottabilité. Il s'agit toujours de particules biologiques, transportées passivement par un fluide en mouvement : l'atmosphère. Ces particules ne sont, en aucun moment, animées de mouvements intrinsèques. Elles sont aéroportées. Qui plus est, en plus d'être anémophiles, les pollens allergisants sont de très petite taille (de 20 à 60  $\mu\text{m}$ ) ; ce qui leur permet de pénétrer profondément dans l'appareil respiratoire. Pour ce qui est de l'abondance et de l'occurrence des espèces, les concentrations de spores et pollens que nous étudions sont généralement non négligeables. Elles conditionnent toutes les étapes du cycle végétatif de la croissance des plantes, suivie de l'éclosion des fleurs, la libération du pollen et enfin le transport et l'élimination des grains de pollens. Ainsi, tant nombre que types de pollens sont fortement dépendants des conditions atmosphériques. À ces conditions physiques, s'en ajoutent d'autres purement géographiques, locales voire humaines, à savoir la présence ou l'absence de sources, les activités humaines proches, l'environnement local et le mode de gestion de ces espaces. L'inquiétude actuelle et manifeste des milieux de la santé vient de l'observation de corrélations significatives entre ces symptômes et le taux croissant d'allergènes dans l'air ambiant (supplément du Médecin du Québec, 1994). Même si le rôle de la pollution vis-à-vis des allergies respiratoires demeure controversé (Liccardi *et al.*, 2001), il est clair que les polluants contribuent au moins à une augmentation des symptômes observés au cours des 10 dernières années. Il est indéniable qu'une de leurs caractéristiques est d'être des irritants des voies respiratoires ; ce qui a pour effet d'entraîner à la fois des dommages chroniques de celles-ci et de favoriser la sensibilisation de certains individus plus vulnérables à certains allergènes aéroportés (D'Amato, 2002). D'après l'étude de Behrendt *et al.* (2001) il existe une bonne corrélation entre les allergies respiratoires et les polluants de type II à savoir, les oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ), l'ozone ( $\text{O}_3$ ), les composés organiques volatiles, la fumée de tabac, les particules fines et très fines. Ceux-ci affectent les pollens en dégradant leur structure, leurs protéines et en entraînant la libération des allergènes qui les composent. En revanche, le lien n'est pas clairement établi avec les polluants de type I tels que le dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ ) et les grandes particules. Les auteurs concluent qu'il existe une évidence nette de relation

entre les allergies et les facteurs environnementaux de la « société dite moderne ». Majd *et al.* (2004), quant à eux, concluent qu'en atmosphère polluée, les pollens contiennent moins de protéines du fait que la pollution les contraint à les libérer sous l'effet de réactions biochimiques. Mais concernant la relation directe avec les symptômes d'allergie ressentis, il semble que les « pollens pollués » soient des pollens potentiellement plus actifs que ceux qui ne le sont pas. Par ailleurs, il faut garder à l'esprit qu'au fur et à mesure de la succession des saisons, les suivantes sont de plus en plus allergènes. Abordant la question du degré de toxicité allergénique, il faut considérer la question du principe actif que sont les allergènes ainsi que celle du seuil clinique. Il s'agit du niveau de concentration à partir duquel on commence à percevoir des symptômes d'allergie. L'allergène n'est pas le grain lui-même mais est constitué de facteurs localisés à sa surface dans l'exine et à l'intérieur dans l'intine et le cytoplasme qui composent sa partie vivante. Ce qui explique le fait que l'on soit allergique autant au pollen vivant qu'au pollen mort (Dowding, 1988). Ces protéines ou glycoprotéines sont capables de déclencher après contact avec la muqueuse des yeux ou du système respiratoire supérieur les mécanismes physiologiques de l'allergie en induisant la synthèse d'anticorps spécifiques dans le système immunitaire des individus sensibles. Von Pirquet (1906) définit la réaction allergique telle que : « *the acquired, specific, altered capacity to react* ». Tous les mots composants cette définition sont importants. En effet, « *acquired* » signifie qu'il y a eu exposition préalable, de sorte que le système immunitaire a pu être stimulé par la mise en contact avec l'allergène et ainsi développer une hyper sensibilité du patient. « *Specific* » fait référence à une relation moléculaire spécifique qui existe entre l'allergène et l'anticorps produit et qui correspond à un message chimique. Il peut arriver que différents allergènes transportent des messages communs favorisant ainsi les risques d'allergies croisées. Enfin, « *altered capacity to react* » fait référence aux différentes réactions possibles induites par le même allergène une fois que les anticorps ont été produits. Cette réaction peut être accrue, cas d'hypersensibilité ou réduite, conséquence d'une augmentation de l'immunité. Dans le cas de l'ambrosie, ce sont King et ses collaborateurs (1964) de l'Université Rockefeller à New York qui ont les premiers isolé et purifié deux d'entre eux, les appelant E et K. Le niveau de risque qui est associé aux pollens est soit dépendant de la concentration de l'allergène en tant que tel ou bien du degré de toxicité de la particule elle-même. D'après Laiidi (1997) 5 différents allergènes ont été isolés dans le cas de l'ambrosie. Ainsi, les effets induits par tel ou tel type d'allergène sur une population donnée peuvent varier selon la concentration de l'allergène mis au contact de la population ou selon le degré de toxicité intrinsèque à l'espèce allergène. Le seuil clinique est ainsi lié à la sensibilité des patients, mais il faut aussi une certaine quantité de pollen dans l'air pour déclencher

une crise.

ii. Notion de seuil et de risque

Plusieurs études ont déjà tenté de mettre en relation des mesures aérobiologiques avec des symptômes d'allergie ressentis par les patients. L'une des premières à avoir établi le lien entre la présence de pollen dans l'air et la symptomatologie d'allergie au sein d'une population est celle de Andrup en Norvège entre 1939 et 1941 (Knox, 1979). Il montre une relation entre la présence de pollens de bouleau de mai à début juin et celle de graminées de fin juin à juillet et la courbe des cas de pollinose déclarés. En 1958, Maunsell mettait en évidence les variations saisonnières des symptômes de l'asthme bronchique allergique en fonction des types de pollens et spores rencontrés dans l'air. Le pollen d'ambrosie quant à lui, est rapidement qualifié de véritable polluant atmosphérique (Hewson, 1967 ; Finkelstein, 1969 ; Basset *et al.*, 1975 ; Edmonds, 1979) à la source de la plus importante rhinite allergique saisonnière le long de la frange Est de l'Amérique du Nord affectant au moins 10% de la population de cet espace géographique (Basset *et al.*, 1977). Brown et ses collaborateurs (1968) confirment les précédentes conclusions de Hewson et montrent l'existence de liens très significatifs entre l'exposition de patients à ce pollen et la sévérité des symptômes observés, laquelle semble s'accroître avec l'augmentation des quantités de pollens libérés durant la période à l'étude. Cette relation mise à jour par Brown *et al.* (1968) est ensuite démontrée à plusieurs reprises depuis (Comtois et Gagnon, 1988 ; Quénel *et al.*, 1997 ; Paquette *et al.*, 2003).

Il n'en demeure pas moins qu'un consensus général est difficile à trouver. En effet, un certain nombre d'éléments peuvent entrer en ligne de compte dans ces études l'intervention de certains paramètres liés à l'environnement physique tels que la station de mesure, la distance du patient à cet échantillonneur de même que le type de pollen en cause et de ce fait, influencer les résultats comme le mode de sélection des patients (Asselin *et al.*, 1998). On peut aussi penser à la période d'échantillonnage comparativement à celle de la compilation des symptômes. Il faut aussi considérer la qualité des grains de pollen en présence de même que les effets de synergie avec certains polluants comme déjà mentionné par Domingues-Wilches *et al.* (1995), Emberlin (1995), Robertson et Lebowitz, (1984), Davies *et al.*, (1998), Lewis *et al.*, (2000), D'Amato, (2002) et Liccardi *et al.*, (2002) ou encore les réactions croisées avec d'autres pollens ou aliments notamment. Celles-ci sont particulièrement avérées entre l'ambrosie et les pommes, les bananes, le melon, la pastèque, la camomille, le miel, les noix et les graines de tournesol.

Le seuil clinique est certes lié à la sensibilité des patients.

Les études épidémiologiques qui permettraient d'étayer les valeurs communément utilisées sont rares. L'expérience disponible provient essentiellement d'échanges entre médecins et patients. Par ailleurs, la dose à laquelle réagit un patient donné un jour donné, peut fluctuer dans le temps et dans l'espace en fonction des conditions de l'environnement (température, humidité relative, niveau de pollution ...), des activités du patient, de son état général, des questions de d'allergies croisées... comme le précisent Geller-Bernstein et ses collaborateurs (2003). On fait, la plupart du temps référence à une « mesure de fond », une mesure « d'ambiance générale » comme le précise Clot (Com. Perso., 29.11.2004) et ce que l'on appelle seuil d'apparition des symptômes chez les personnes sensibilisées ne suffit pas nécessairement pour déclencher une sensibilisation. Ainsi n'est-il pas toujours aisé de déterminer à partir de quel seuil, les symptômes d'allergies apparaissent et s'aggravent tout en affectant une grande part de la population. Dans le cas de l'étude épidémiologique menée par Geller-Bernstein *et al.* (2003) des niveaux de seuils spécifiques sont apparus pour chaque type de plantes prises individuellement et ces seuils sont inférieurs à ce que l'on trouve habituellement dans la littérature. Les auteurs en concluent que la détermination de seuils nécessite la prise en compte de la spécificité des plantes, mais aussi de la région dans le monde et du groupe ethnique étudié. Waisel *et al.* (2004) publient les résultats d'une étude qui vise à mettre à jour des corrélations entre les concentrations polliniques et l'incidence d'allergie, à déterminer les plus faibles niveaux au-delà desquels les symptômes sont déclarés pour des espèces spécifiques et enfin à estimer dans quelle mesure la variation des symptômes d'allergie sont liés aux fluctuations des concentrations d'espèces polliniques particulières. Ils montrent que les corrélations diffèrent d'un allergène à un autre, que les meilleures d'entre-elles sont associées entre des espèces polliniques et les patients souffrant de symptômes d'oto-rhino-laryngologie (ORL). Dans tous les cas, les premiers symptômes apparaissent lorsque la concentration moyenne hebdomadaire dépasse un certain seuil (2-4 grains/m<sup>3</sup> pour l'olivier, 3-5 pour les graminées, 4-5 pour l'armoise ...). Enfin, ils montrent que les 2/3 des fluctuations des symptômes sont expliqués par les fluctuations du contenu pollinique de l'air.

Concernant l'ambrosie, le manque de consensus est également vrai. Il est en revanche reconnu qu'elle fait exception comparativement aux arbres moyennement allergènes mais qui produisent beaucoup de pollen et aux graminées très allergènes qui en produisent relativement peu mais sur une période étendue dans le temps, puisqu'elle est très allergène et produit beaucoup de pollen chaque année et ceci, où que l'on soit. Durant la saison de pollinisation de l'ambrosie, d'autres espèces également très allergènes sont présentes comme c'est le cas du pollen de l'*Iva* (de la famille des Composées, tubuliflores) mais sont, la plupart du temps, masquées par

l'ambrosie. Lewis *et al.* (1983) notent que les graminées seraient la deuxième cause d'allergie durant la saison de l'ambrosie. En 1984, Solomon indique que dès que les concentrations d'ambrosie varient entre 10 et 50 grains/m<sup>3</sup> d'air, les personnes sensibles la ressentent. Le même auteur précise en 1980 qu'à partir de 100 grains d'ambrosie/m<sup>3</sup> d'air, les symptômes sont clairs. En 1988, Comtois et Gagnon trouvent à Montréal, que le seuil clinique pour la saison d'ambrosie que l'on définit comme étant la concentration quotidienne au-dessous de laquelle le pollen ne génère pas de symptôme de pollinose est de 1 à 3 grains/m<sup>3</sup> d'air et n'excède pas 13 grains/m<sup>3</sup> pour la majorité des personnes allergiques (Banken *et al.*, 1990). La réponse de la population est alors importante en terme de nombre d'individus affectés même si certains d'entre eux ne présentent pas de symptômes allergiques particuliers lors des autres périodes polliniques typiques. D'autres auteurs dont Jelks (1991), Emberlin (1994) ou Jäger (1998) proposent d'autres échelles présentées dans les Tableau 1.3.

Concentration d'ambrosie	Manifestation des symptômes	Littérature
de 10 à 50 grains/m <sup>3</sup> d'air	Symptômes ressentis par une majorité d'allergiques	Solomon, 1984
à partir de 100 grains/m <sup>3</sup> d'air	Symptômes clairs	Salomon, 1980
de 1 à 3 grains/m <sup>3</sup> d'air	Seuil clinique d'apparition des premiers symptômes	Comtois <i>et al.</i> , 1988
Moins de 13 grains/m <sup>3</sup> d'air	Symptômes ressentis par une majorité d'allergiques	Banken <i>et al.</i> , 1990
Au moins 20 grains/m <sup>3</sup> d'air	Seuil clinique d'apparition des premiers symptômes	Jelks, 1991
de 20 à 200 grains/m <sup>3</sup> d'air	Symptômes ressentis par une majorité d'allergiques	Jelks, 1991
Plus de 200 grains/m <sup>3</sup> d'air	Tous les allergiques sont affectés	Jelks, 1991
Au moins 20 grains/m <sup>3</sup> d'air	Seuil clinique d'apparition des premiers symptômes	Emberlin, 1994
Au moins 20 grains/m <sup>3</sup> d'air	Seuil clinique d'apparition des premiers symptômes	Jäger, 1998

Tableau 1.3 : Synthèse issue de la littérature des principaux seuils attribués au pollen de l'ambrosie

Afin de rendre plus accessible au public cette question des seuils qui intéresse médecins et chercheurs sous la forme de concentrations chiffrées, on traduit ces valeurs selon une échelle de risque d'allergie. A titre d'exemple, le Réseau National de Surveillance Aérobiologique (RNSA) en France associe les résultats des mesures aérobiologiques à une estimation de la sévérité des symptômes chez les patients, fournie par les allergologues du réseau. Ainsi, ils définissent des niveaux de risque allant de 0 à 5, soit de nul à très élevé. Le niveau de risque 0 se situe pour l'ambrosie dès que l'on a des concentrations inférieures à 1 gr/m<sup>3</sup>/jour, puis le risque très faible est compris entre 1 et 2, faible jusqu'à 5, modéré au-delà de 5 et jusqu'à 10, élevé jusqu'à 30 puis, pour finir le risque maximal se situe dès lors que les concentrations dépassent 30 grains/m<sup>3</sup>/jour (Thibaudon, 2002 et Com. Perso., 2004). En Suisse, Météo-Suisse qui est en charge de l'aérobiologie se base sur l'expérience française et utilise en cas d'exposition à l'ambrosie le seuil de 5 grains/m<sup>3</sup> d'air pour qualifier le niveau de risque moyen et la valeur de 10 grains/m<sup>3</sup> d'air pour caractériser le risque fort (Clot, Com. Perso., 29.11.2004). A Montréal, la Ville de Montréal définit également des classes de risques en fonction de la concentration de pollen mesurée. Ainsi le

risque est nul lorsque les concentrations sont inférieures à 2 grains/m<sup>3</sup> d'air, il est faible lorsqu'elles sont comprises entre 3 et 24, moyen entre 25 et 99, élevé de 100 à 299 et finalement très élevé au-delà de 300 grains/m<sup>3</sup> d'air. Ces échelles de risques sont plus explicites pour le patient qui ne demande pas à savoir quel est le contenu exact en pollen dans l'air mais bien quels sont les risques qu'il prend lors d'un déplacement à l'extérieur ou alors qu'il aère sa maison. Elles mériteraient cependant d'être pondérées par les conditions environnementales. Les deux exemples cités montrent à quel point le consensus est délicat. Ces échelles s'entendent sur la détection des premiers symptômes résultant de l'exposition au pollen de l'ambrosie mais ne sont en rien comparables en ce qui concerne le risque élevé.

### iii. Situation actuelle au Québec et à Montréal

Au Québec, province canadienne la plus sévèrement touchée, le nombre d'allergies respiratoires est en constante progression. Selon des sondages effectués, 10 à 15% de la population serait indisposée par le pollen de l'ambrosie, soit entre 600 et 900 000 personnes contre 6% en 1987. Il semblerait que dans certaines régions, on puisse bel et bien voir 12% de la population locale malade et l'on estime aujourd'hui à 10% la part de la population totale probablement sensible aux allergies respiratoires d'origine pollinique. On doit cependant faire une distinction entre les résidents de la Grande Région de Montréal, ceux de la Montérégie, de Lanaudière et de la ville de Québec qui sont plus susceptibles que partout ailleurs dans la province à déclarer ce type de problème de santé (Figure 1.2). En 1994, la Direction de la Santé Publique à Montréal annonçait qu'environ 10% de la population résidente de Montréal souffrait de ce problème. Encore plus récemment, en 1996, Goulet et ses collaborateurs évaluaient à 19.2% la part de la population totale montréalaise affectée, ceci ayant pour incidence qu'un ménage sur trois abrite au moins une personne qui souffre d'allergie respiratoire. Si l'on considère maintenant cette prévalence durant la période de l'ambrosie, c'est 5.6 à 11.2% des répondants qui se disent allergiques, ce qui équivaut à 100 à 200 000 Montréalais. Cette valeur de 200 000 personnes vivant dans la Communauté Urbaine de Montréal est confirmée par Environnement CUM en 1998. En 1998, la pollinose affectait toutes saisons polliniques confondues, 8.4% de la population québécoise globale comparativement à 6% en 1987 (Flash Herbe à poux, vol.2, n°3). Ce problème de santé est plus fréquemment rapporté chez les jeunes et les adultes entre 15 et 44 ans (Table Québécoise sur l'herbe à poux, 2002). Drouin (1998) de la Direction de la Santé Publique de Montréal Centre estimait qu'à Montréal une personne sur dix souffrait d'allergie saisonnière. Le rapport du Regroupement Montréalais pour la Qualité de l'Air de 1998 révèle une augmentation de plus de 40% de la prévalence des allergies pulmonaires entre 1978 et

1991. La responsabilité du pollen de l'ambroisie n'est plus à déclamer. Il est à noter que dans le cas de ce pollen la réaction d'hypersensibilité est immédiate (Sunder *et al.*, 1990). Les derniers résultats publiés dans le Flash Herbe à Poux de septembre 2003 ne sont guère encourageants. L'évolution annuelle de la tendance moyenne annuelle de l'indice du pollen d'herbe à poux à Montréal était à la baisse entre 1977 à 1991 alors que depuis 12 ans elle semble augmenter de nouveau (Figure 0.1). L'ambroisie affecte la qualité de vie et le rendement économique de millions d'individus. Les Canadiens dépensent plus de 230 millions de dollars canadiens en médicaments du début du mois d'août jusqu'à la fin octobre. Actuellement, la rhinite coûterait aux Québécois atteints par la maladie plus de 85 millions \$CAD annuellement pour l'achat d'antihistaminiques. Toujours selon le rapport sur les maladies respiratoires au Canada (2001), les maladies respiratoires toutes confondues comptaient en 1998 pour 19.2% des cas de mortalité chez l'homme et 15.9% dans le cas des femmes. La Direction de la Santé Publique de Montréal en a depuis plusieurs années fait son cheval de bataille.

## 2. Trajectoire aérobiologique et couche limite

Certes un grand nombre de facteurs d'ordre socio-économique interfèrent en agissant ou sur la sensibilisation de la population ou sur une augmentation du nombre de terrains dénudés très appréciés par la plante. La situation est donc relativement complexe. Toutefois, les conditions qui ont l'effet le plus immédiat sur les quantités mesurées de pollen, sont sans conteste, les conditions climatiques qui sont aussi responsables de la variabilité interannuelle des concentrations de pollen (Christin, 2003).

Outre les questions des sources actuelles, de l'envahissement par la plante de nouveaux territoires, phénomène qui devrait selon toutes vraisemblances augmenter dans un contexte de changement climatique au même titre que la toxicité associée à ces pollens et avec elle, les risques d'allergie, c'est l'impact des conditions atmosphériques sur les quantités de pollen mesurées dans l'air qui nous préoccupe. La trajectoire aérobiologique (figure 0.2) caractérisée par les trois principales phases de la vie « aérienne » du pollen (Gregory, 1973), à savoir l'émission, suivie du transport puis de la déposition, est sous l'influence directe et constante des conditions du milieu atmosphérique environnant et de plus grande échelle également. Différents facteurs météorologiques interviennent à différents moments du développement initial de la plante jusqu'à l'élimination de son pollen de l'air. Dans tous les cas, ils vont avec plus ou moins d'effet déterminer le devenir de la plante elle-même, de sa saison de croissance, de la quantité de pollen qu'elle va annuellement produire, ainsi que de la quantité qui

sera réellement émise dans l'air et durant quelle période de temps. Même si les facteurs météorologiques les plus influents de la spora pollinique sont en général la température moyenne quotidienne et les totaux journaliers de précipitations (Comtois, 1987), il n'en demeure pas moins qu'il est nécessaire de mettre en évidence, pour chacune des étapes de la trajectoire, le ou les facteurs météorologiques particulièrement influant dans un sens ou dans un autre. Il se peut aussi que ce soit la conjonction de plusieurs de ces facteurs qui soit déterminante.

Étant donné que l'objectif de ce travail est de vérifier la faisabilité de simuler de manière fiable un nuage de pollen d'ambroisie à partir d'un modèle numérique de climat régional, il est important de comprendre ce qu'il se passe dans la réalité au cours de cette trajectoire. Nous n'interférerons pas sur les conditions atmosphériques du modèle bien évidemment car celles-ci sont déjà déterminées avec une bonne fiabilité. En revanche nous comparerons des situations mesurées ou globalement observées sur le terrain avec les situations simulées et nous estimerons la fiabilité du modèle à reproduire l'observation pollinique. En effet, dans le MRCC tel que nous l'employons, nous prescrivons les sources de pollen. Nous n'intervenons en revanche pas du tout sur les conditions atmosphériques. Ce que le modèle nous offre donc est une image de l'effet de ces conditions sur des quantités prescrites de pollen. Cette section est donc d'une importance cruciale vis-à-vis de l'interprétation que nous ferons ultérieurement de nos propres résultats dans le chapitre 3.

Nous nous attardons à décrire les effets connus et recensés dans la littérature des principaux paramètres météorologiques à l'occasion des différentes étapes de cette trajectoire. Il est cependant préalablement nécessaire de cerner le milieu dans lequel nous travaillons. En effet, le pollen est émis par des plants d'au plus quelques centaines de cm de haut, dans une région atmosphérique appelée couche limite atmosphérique (CLA). Cette région de l'atmosphère présente des caractéristiques très spécifiques, directement associées à la nature même de sa structure. Nous regarderons de même comment le milieu urbain interfère sur la décomposition de la CLA et donc influence la trajectoire aérobiologique.

### 2.1. Décomposition de l'atmosphère et rythmes de la CLA

Le pollen est émis à proximité de la surface dans la couche limite atmosphérique (CLA). Elle constitue la base de l'atmosphère. Son contact direct avec la surface terrestre lui confère son caractère. La connaissance de sa structure s'avère fort utile en vue de comprendre les effets des paramètres qui la composent et qui gouvernent ses rythmes sur la trajectoire aérobiologique et plus spécifiquement sur le transport du pollen.



L'atmosphère est un milieu hétérogène dans l'horizontale comme dans la verticale. De nombreuses modifications climatiques interviennent à différentes échelles spatio-temporelles. De ce fait, les capacités de l'atmosphère à transporter ou diluer du pollen varient continuellement dans le temps et dans l'espace. Elle a, en principe, une capacité énorme à disperser les quantités présentes, toutefois cette capacité peut varier selon le milieu à l'étude (type et structure de la surface) ou encore son propre état. Le découpage classiquement admis veut que dans la verticale, elle se décompose selon un certain nombre de couches horizontales superposées les unes sur les autres, toutes définies par des conditions de température et de pression spécifiques. Une représentation schématique est proposée à la Figure 1.6. On peut dire que l'atmosphère se compose de 3 couches relativement chaudes qui se situent, pour l'une à proximité du sol la basse troposphère, pour l'autre entre 50 et 60 Km englobant une part de la haute stratosphère et de la basse mésosphère et enfin la troisième, au-delà de 120 Km dans la thermosphère. Entre deux, se trouvent deux couches beaucoup plus froides. La zone la plus proche du sol constituant la troposphère englobe la CLA.

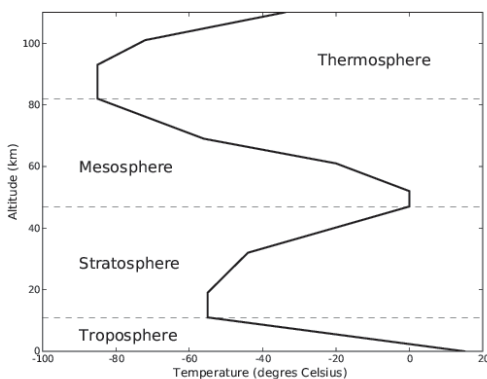


Figure 1.6 : Température de l'atmosphère (°C) en fonction de l'altitude (km). Source : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A8re\\_de\\_la\\_Terre](http://fr.wikipedia.org/wiki/Atmosph%C3%A8re_de_la_Terre)

La troposphère qui s'étire entre la surface terrestre et la tropopause située à environ 11 Km d'altitude mais dont l'altitude varie en fonction de la latitude, contient 79% du contenu gazeux de l'atmosphère de même que pratiquement toute la vapeur d'eau. Par ailleurs, la moitié du poids de l'atmosphère se situe dans les 5500 premiers mètres de celle-ci. C'est aussi dans la troposphère qu'ont lieu les principaux phénomènes climatiques et turbulents. Elle se caractérise par une décroissance de la température avec l'altitude d'environ 6.25°C par Km. La tropopause agit en quelque sorte comme un couvercle au-dessus de cette région directement influencée par la surface terrestre. Il s'agit d'une zone d'air plus chaud où la température demeure constante avec l'altitude. Elle a pour effet de limiter les échanges avec les couches supérieures. La troposphère se décompose elle-même en deux couches

d'air dominantes, l'une directement influencée par la surface et que l'on dénomme couche limite atmosphérique (CLA) et l'autre, appelée atmosphère libre qui la surplombe (Stull, 1989 ; Oke, 1987).

#### i. Couche limite atmosphérique

Nombreux sont les auteurs qui ont étudié cette région de l'atmosphère. Parmi eux nous pouvons citer ceux que nous avons retenus à savoir Oke (1987, 1997) et Stull (1989). Cette information est pleinement disponible, il n'est donc pas question d'en faire une répétition ici. Toutefois, nous jugeons que certains points sont nécessaires au regard de nos analyses ultérieures. Dans ce sens, nous accordons quelques pages à la description des principaux éléments et paramètres entrant dans le cadre de cette recherche.

La couche limite atmosphérique est définie par Oke (1987) comme étant la partie inférieure de la troposphère, caractérisée par le bon développement d'une zone de brassage turbulent généré par la friction de l'atmosphère en mouvement sur la surface terrestre rugueuse (turbulence mécanique) de même que par le développement et l'ascendance d'éléments convectifs à partir de la surface terrestre échauffée (convection thermique). Ce processus de turbulence est à l'origine de la plus grande part de la chaleur de la CLA. Il en va de même de son contenu en eau. Cette caractéristique la rend particulièrement attrayante et complexe à la fois, au regard des processus de transport et de mélange qui vont pouvoir s'y produire. Elle est aussi définie par Stull (1989) comme étant la partie de la troposphère directement influencée par la présence de la surface terrestre et qui répond aux sollicitations de la surface avec une échelle de temps d'environ une heure. L'ensemble de la troposphère peut connaître des modifications sous l'effet de la surface mais cette réponse est relativement lente comparativement à ce qui se passe au sein de la CLA. C'est dans ce sens que Stull (1989) attribue à la CLA une échelle de temps de l'ordre d'une heure, ce qui ne signifie pas que la CLA atteint l'équilibre dans ce laps de temps mais bien que les modifications s'y font ressentir. Ces sollicitations de la surface englobent la traînée de friction, l'évaporation et l'évapotranspiration, le transfert de chaleur, les émissions polluantes et polliniques ainsi que les modifications liées à la présence du terrain. L'épaisseur de la couche limite varie donc dans le temps et l'espace allant de quelques centaines de mètres à quelques kilomètres. Cette notion de variation diurne est une des clés de la CLA. La présence de la surface est à l'origine de ces fluctuations diurnes. Elles ne sont pas en effet générées par la radiation solaire directe mais bien par le fait qu'une partie de cette radiation est absorbée et réémise par la surface. Il est ici question de forçage radiatif. Environ 90% du rayonnement solaire est absorbé de la sorte.

La couche limite atmosphérique connaît donc des rythmes



diurnes dûs aux caractéristiques radiatives de la surface terrestre et à la périodicité des processus physiques tels le rayonnement. Sur les océans ou les grandes surfaces en eau, la structure de la CLA varie relativement peu dans le temps et dans l'espace, ceci du fait de l'inertie thermique de ces milieux qui inhibe les variations quotidiennes. La plupart des changements notables observables sur l'océan sont le fruit soit de mouvements verticaux d'échelle synoptique ou de méso échelle, soit de l'advection de masses d'air. Même dans de tels cas, lorsque l'équilibre est ensuite de nouveau atteint, la profondeur de la CLA n'a varié que de 10% sur 1000 Km (Stull, 1989). Nous pouvons par ailleurs remarquer sur la Figure 1.7 que peu importe la surface sous jacente, la CLA est toujours plus développée en zone de basse pression et inversement sous une haute pression.

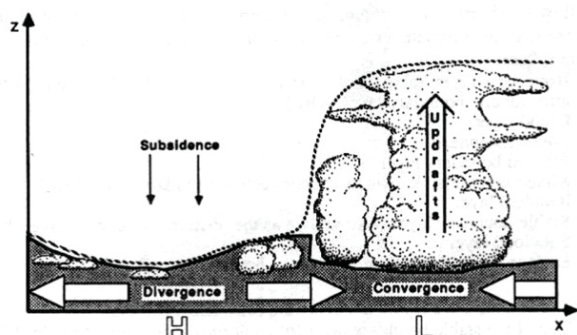


Figure 1.7 : Représentation schématique des variations d'échelle synoptique (haute et basse pression). D'après Stull, 1989

C'est dans ces zones les plus minces que le ciel est normalement le plus clair voire accepte quelques nuages de beau temps. En zone de basse pression, la couche de mélange est beaucoup plus développée et l'on attribue généralement le sommet de la CLA à la base des nuages.

La Figure 1.8 issue de Stull (1989) représente la variation diurne de la CLA en situation de haute pression. Dans ce cas de figure la structure est très claire et évolue au fur et à mesure de la journée et de la nuit. Trois sous divisions majeures apparaissent qui sont la couche de mélange, la couche résiduelle et la couche nocturne stable. En plus de ces trois principales subdivisions, une autre couche qui représente 10% de la CLA, est présente à tout moment du jour et de la nuit. Il s'agit de la couche de surface. Dans cette frange, très proche du sol, les flux turbulents de même que les stress tels le cisaillement ne varient que de 10% de leur magnitude (Stull, 1989). Au sein de cette bande d'atmosphère, une autre subdivision est possible qui ne considère cette fois que les quelques centimètres au-dessus du sol, il s'agit d'une portion de l'atmosphère dans laquelle la diffusion moléculaire est dominante pour le transfert des quantités de chaleur, mouvement et vapeur d'eau. On parle de couche laminaire de surface.

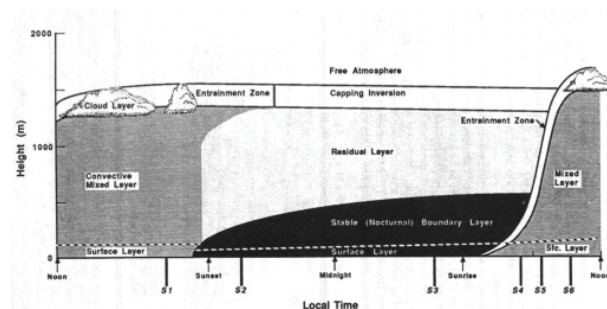


Figure 1.8 : Représentation schématique de la couche limite atmosphérique et variation diurne. D'après Stull, 1989

## ii. Couche de mélange

Il s'agit de la couche turbulente, généralement issue de la convection thermique. Il peut aussi arriver qu'elle soit associée à des régions de grands vents. Par source convective on entend, transfert de chaleur au-dessus d'un sol chaud et refroidissement radiatif à partir du sommet de la couche de nuage. La première situation génère des mouvements ascendants d'air chaud alors que la seconde induit de la subsidence d'air froid. Il peut arriver que ces deux processus aient lieu simultanément notamment lorsque qu'une masse d'air froide couverte de stratocumulus est advectée au-dessus d'une surface plus chaude. Même si dans cette couche de mélange la turbulence est surtout d'origine thermique, il n'en demeure pas moins qu'il existe aussi du cisaillement qui contribue à renforcer la turbulence. Quoiqu'il en soit cette couche se développe en fonction du réchauffement procuré à la surface par le rayonnement solaire. Environ une demi-heure après le levé du soleil, la couche turbulente commence à se développer. Elle se caractérise par un intense mélange et une situation statique instable. La profondeur maximale de cette couche de mélange est atteinte en fin d'après midi. La turbulence intense qui la compose tend à mélanger chaleur, humidité et quantité de mouvement ainsi que polluants et pollen uniformément dans la verticale (Stull, 1989).

Elle se développe au cours de la journée par effet d'entraînement à son sommet grâce à une petite couche stable qui la sépare de l'atmosphère libre. Cette région de l'atmosphère plus stable est communément appelée zone d'inversion peu importe la magnitude de la stabilité. Lorsque l'on parle de hauteur de mélange ( $z_i$ ), on s'intéresse à la portion de l'atmosphère comprise entre la surface et la base de cette zone d'inversion. Au fur et à mesure que la journée avance et plus celle-ci est chaude, on voit se développer des thermales qui, à force de s'élever, finissent par atteindre leur niveau de condensation. Ce phénomène explique la présence de cumulus de beau temps. Inversement, un ciel fortement à moyennement couvert va induire une réduction de la vigueur des thermales. Dans ce cas, le développement vertical de la couche de mélange est moindre et voire

même peut perdre ses caractéristiques turbulentes et devenir neutre si le couvert est épais. Elle s'apparente alors à la couche résiduelle.

### iii. Couche résiduelle

La journée se poursuit et environ ½ heure avant le couché du soleil, les thermales cessent leur activité (ceci en l'absence d'advection d'air froid). Le potentiel turbulent de la couche de mélange diminue. Il en résulte une couche d'air qui conserve les propriétés initiales de la couche de mélange pour les différentes variables physiques et de concentrations mais selon un état moyen. Cela signifie qu'en l'absence d'advection nocturne, les particules émises durant la journée dans la couche de mélange et non déposées à la tombée de la nuit pourront se retrouver en suspension et perdurer pendant la nuit dans la couche résiduelle. Cette couche est dite neutre, c'est-à-dire que la turbulence y est de toute part égale. Ainsi, à l'image du panache de fumée, un nuage de pollen subsistant dans cette couche tend à se disperser de manière égale dans la verticale et l'horizontale, suivant une forme conique. Le lendemain matin, cette couche persiste un moment avant de se faire « rattraper » par la nouvelle couche de mélange. Un certain nombre de réactions de nature photochimique peuvent avoir alors lieu mais qui n'entrent pas dans le cadre de ce travail. C'est aussi à ce moment-là que se produit l'émission du pollen par l'ambrosie. La couche résiduelle, à la différence de la couche de mélange n'a aucun contact avec le sol. Elle chapeaute pendant la nuit la couche nocturne stable dont l'épaisseur évolue au cours de la nuit par « grignotage » de la base de cette couche résiduelle. Ainsi Stull (1989) précise que de ce fait la couche résiduelle n'est pas une couche limite au sens que l'on l'entend puisqu'elle n'est pas directement influencée par la surface et ne possède donc pas les propriétés physiques et dynamiques qui en découlent. Elle n'en demeure pas moins importante puisqu'elle est directement impliquée dans le devenir des particules émises au cours de la journée et demeurant en suspension.

### iv. Couche nocturne stable

Au fur et à mesure que la nuit s'installe, une couche nocturne, stable, se développe correspondant en fait à la base de la couche résiduelle mais avec des caractéristiques influencées par les conditions de la surface. Elle se caractérise par une couche d'air stable présentant à l'occasion quelques épisodes épars de turbulence beaucoup plus légère. Il peut en effet arriver qu'en dépit du fait que le vent tombe en principe la nuit, des rafales se produisent à des vitesses de vent géostrophique que l'on appelle jet de bas niveau ou jet nocturne. Bien que la stabilité statique de l'air tende à supprimer la turbulence, ces jets génèrent des effets de cisaillement qui tendent à en créer. Le résultat est que la turbulence nocturne

est de nature plutôt brutale et brusque. Si la couche de mélange présente un sommet bien défini, celui de la couche nocturne stable ne l'est pas. Il se perd dans la base de la couche résiduelle. Si des polluants sont émis dans cette couche, le panache de fumée ou le nuage de pollen a tendance à s'étirer dans l'horizontal sans se disperser dans la verticale. Le pollen qui est émis ou plutôt se trouve piégé dans cette couche suit la trajectoire qui lui est attribuée par le vent dominant et sous l'effet de la gravité se retrouve rapidement au sol. Si une légère brise existe, elle peut en revanche dissiper ce panache latéralement suivant le sens dominant du vent. Par nuit calme et claire, cette couche peut se développer sur plusieurs mètres au-dessus de la surface et agit comme un couvercle qui maintient les particules en suspension les empêchant de gagner quelques tourbillons de turbulence à moins que certains phénomènes extrêmes de vent et d'échauffement des surfaces ne rompent la structure laminaire de cette couche d'air. Si cette couche laminaire est suffisamment forte pour empêcher tout échappement des pollens vers de plus hautes altitudes, on considère cette surface comme étant lisse du point de vue aérodynamique. En revanche, si des obstacles interviennent, on parle alors de couche rugueuse. Ainsi, la même surface peut présenter différents caractères de rugosité et ceci en fonction des conditions thermiques et de vent.

Cette description de la CLA est importante car toute la trajectoire aérobiologique se produit en son sein. Il est maintenant tout aussi important de caller dans le temps les différentes phases de cette trajectoire en accord avec les phases diurnes de la CLA. Un premier regard est porté sur l'émission et l'élimination du pollen. En effet, dans le cas des simulations effectuées, émission et déposition sont contrôlés par l'expérimentateur. L'impact des conditions atmosphériques générées par le modèle lui-même n'est donc pas déterminant au regard de la problématique de cette étude. Il n'en demeure pas moins qu'il est important de faire un état des connaissances sur la question dans le but d'envisager des améliorations futures de la prise en charge de ces deux phases par le modèle.

### v. Présence du milieu urbain et impacts

Du fait de sa configuration et des caractéristiques de sa surface, la ville est un environnement généralement plus chaud que ses alentours (Chandler 1976). Le processus d'urbanisation induit en effet des changements radicaux de la surface qui entraînent des modifications importantes des propriétés atmosphériques régionales des conditions radiatives, thermiques, d'humidité et aérodynamiques. Les matériaux de construction employés en ville sont différents de ceux trouvés à la campagne. Les caractéristiques du drainage, les sources de chaleur « artificielle » nombreuses - Geiger (1965) considère cet aspect comme étant le plus déterminant - la configuration géométrique (réseau de rues, densité et hauteur du

bâti, matériaux de construction, quantité de végétation disponible, revêtement des surfaces...) et enfin, l'émission de polluants dans l'air urbain, contribuent à perturber ce milieu. L'effet majeur de cet ensemble de transformations est de complètement déséquilibrer les bilans naturels solaire et hydrologique (Chandler, 1965; Landsberg, 1981; Oke 1974, 1976, 1987, 1997). Il en découle plusieurs effets.

Le premier, de nature phénologique, est d'initier des conditions favorisant la floraison plus hâtive de la plupart des taxons rencontrés en milieu urbain. Les résultats de Durand (1986) vont dans ce sens dans le cas de Montréal comparativement à la ville de Québec. De son côté, Davies (1969) met en évidence lors d'une étude comparative de l'aérobiologie des villes de Liverpool, Glasgow et Londres, que les concentrations de pollen sont toujours plus importantes dans la capitale. Outre les effets topographiques et géographiques, les conditions climatiques semblent particulièrement déterminantes, notamment la température plus élevée et la provenance des vents dominants. Ainsi, à Londres, il note que la saison des herbacées est toujours plus en avance qu'ailleurs. Mercuri et ses collaborateurs (1984), pour leur part, montrent pour la ville de Sienne (Italie) des relations entre les fortes quantités de pollen et l'augmentation de la température, la baisse de l'humidité relative de même que l'absence de précipitations. Il est toutefois possible de citer à ce propos quelques travaux de Heise et al. (1957), Davies (1965, 1969) en Angleterre, Fishbach (1976, 1986) pour ce qui est du pollen d'Ambrosia exclusivement dans le Wisconsin, Kämpylä (1984) à Jyväskylä en Finlande, ceux de Bryant et al. (1989), Emberlin et al. (1990) dans le cas de Londres, Hasnain (1993) à Auckland en Nouvelle-Zélande et enfin Hart et al. (1994) à Leicester (R. U.). Ces quelques études purement urbaines portent la plupart du temps sur les variations des quantités de pollens entre divers milieux et pour ce faire, considèrent le plus souvent le milieu urbain comparativement au milieu rural proche (Donini et al. 1987), sans toutefois réellement étudier les disparités au sein du milieu urbain. Mentionnons cependant que Heise et al. (1957) ont noté que les concentrations polliniques sont en principe plus faibles sous le vent d'une ville, qu'au vent de celle-ci. Par la suite, Harvey (1973) montre que les concentrations polliniques recueillies en ville sont généralement plus faibles comparativement à celles mesurées à la campagne, en dehors des limites urbaines. Fishbach (1976) confirme ce résultat pour Ambrosia et justifie son résultat en précisant que la taille des comptes est fonction de la distance à la source. Norris-Hill et al. (1991) indiquent à ce propos que les concentrations de pollen mesurées au coeur de la région Centre Nord de Londres sont en moyenne 7 fois inférieures à celles obtenues à l'extérieur de la ville. Dans le cas de Montréal, la topographie bien que peu accentuée et caractérisée par la présence du fleuve Saint Laurent ainsi que celle du

Mont Royal dominant le centre-ville, doit avoir un effet sur la dispersion du nuage d'ambrosie en influençant potentiellement les mouvements atmosphériques. Comtois et Gagnon (1990) ont mis en évidence ce que l'on peut appeler une circulation spécifique des grains de pollens depuis leur source jusqu'à leur lieu de sédimentation comme nous pouvons le voir sur la Figure 1.9.

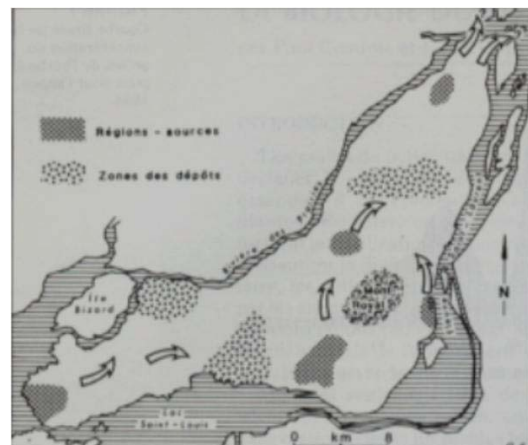


Figure 1.9 : Distribution des sources et puits de pollen d'ambrosie sur l'île de Montréal, selon Comtois et Gagnon, 1990

C'est au centre-ville de Montréal que les auteurs mesurent les plus grandes quantités de pollen. Cet environnement semble jouer le rôle d'une trappe à pollen. Les conditions atmosphériques générées par la présence de la ville et de sa structure ainsi que par la circulation automobile qui entraîne une reprise en charge du pollen déjà déposé n'y sont, d'après les auteurs, peut être pas pour rien.

Le second est de générer de la turbulence convective d'origine thermique et mécanique qui ralentit le rythme auquel se font en principe, dans un milieu plus calme, les phénomènes de déposition et les amenuise aussi (Heise et al. 1957). Ces conclusions sont les mêmes que celles de Emberlin et ses collaborateurs (1991) qui stipulent de plus, que le vent induit plus de contrastes au niveau des comptes, notamment si le temps est humide, du fait que la turbulence générée par ces conditions, entraîne la remise en suspension de grains de pollen préalablement déposés.

Enfin, vue la population qui fréquente chaque jour le centre d'une ville, les risques d'y développer des allergies y sont beaucoup plus grands (Emanuel, 1988). En effet, en dépit de l'absence potentielle de sources d'ambrosie en centre-ville, il faut cependant noter que la plupart du temps les seuils de tolérance y sont pourtant dépassés en termes de quantités de pollen mesurées. Sur un autre plan, Ziska et al. (2003) font mention de l'impact des températures urbaines généralement plus élevées sur les quantités de pollen mesurées, dans le sens qu'elles nous permettent d'entrevoir la ville comme un laboratoire du



futur au regard des changements climatiques (Figure 1.10).

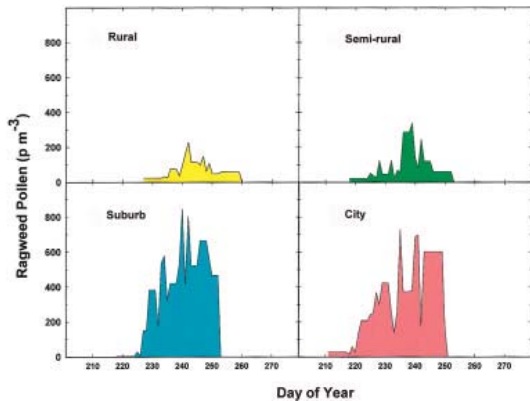


Figure 1.10 : Pollen d'ambroisie et milieu urbain et périurbain. Adapté d'après Ziska et al. (2003)

Du point de vue de la dispersion du pollen, les deux aspects qui nous intéressent le plus sont la modification du champ de vent et le développement de l'îlot de chaleur urbain qui perturbent les conditions locales voire régionales.

Par ailleurs, la présence de la ville a un effet sur le profil de la vitesse du vent (Figure 1.11). Ce graphique représente l'évolution du profil de vent au fur et à mesure que l'on pénètre dans le milieu urbain. Les valeurs représentent les pourcentages du gradient de vent au sommet de la couche limite.

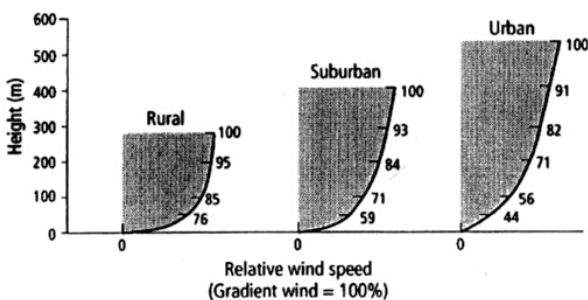


Figure 1.11 : Représentation schématique des changements dans le profil du vent alors que l'air se déplace d'une zone rurale vers une zone urbaine. D'après Davenport (1965), modifié par Oke, 1997

On remarque que quelque soit la hauteur considérée, il y a décroissance de la vitesse plus on entre dans le milieu urbain mais que par ailleurs, le sommet de la couche limite s'élève en même temps laissant apparaître une couche de mélange beaucoup plus développée verticalement au-dessus d'une ville dans laquelle la rugosité est plus marquée qu'elle ne l'est au dessus du milieu rural. La conséquence de ceci est un accroissement marqué de la turbulence d'origine mécanique dans la ville et le développement d'une circulation qui force les vents régionaux à s'élever au-dessus du panache urbain, sous

le vent de la ville. Notons comme vu à la Figure 1.16 que bien que l'on dise généralement que la ville a pour effet de réduire la vitesse du vent, nous devons savoir que ce n'est pas toujours le cas. Il serait plus juste de dire que la ville initie une très forte variabilité spatiale de la vélocité et de la direction du vent à l'intérieur de celle-ci.

Les bilans radiatifs et énergétiques du milieu urbain sont modifiés par les caractéristiques de la surface elle-même, de son organisation et les activités anthropiques. Il en résulte un milieu généralement plus chaud que les environs. Cet îlot de chaleur se fait sentir dans la canopée urbaine comme dans la couche limite urbaine<sup>3</sup> (CLU). Les conditions favorisant son développement sont soit nocturnes et peuvent parfois persister en début de journée, soit associées à un couvert nuageux. Il s'étale dans l'horizontale selon la direction du vent dominant et dans la verticale à partir du centre-ville et son intensité est très largement fonction de la densité du bâti, du type de surfaces et plus globalement de la taille de la ville.

La Figure 1.12 montre que l'intensité de l'îlot est bel et bien corrélée à la taille de la ville concernée (Landsberg, 1981), le logarithme de la population et la géométrie des rues canyon du centre ville (ratio hauteur sur profondeur et facteur de vue du ciel).

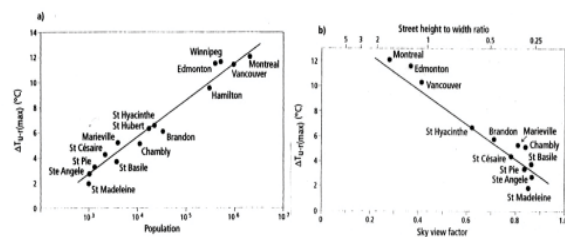


Figure 1.12 : Relation entre l'intensité de l'îlot de chaleur ( $\Delta T_{u-r \max}$ ) et la taille de la ville au Canada (a) de même que la géométrie des rues canyon en cœur de ville (b) tenant compte des facteurs : vue du ciel (sky view factor) et du rapport de hauteur sur largeur de rue. Les droites de régression sont issues d'une plus grande base de données Nord Américaine. D'après Oke, 1973, 1981, revu en 1997

On note aussi des gradients thermiques qui peuvent être très tranchés à la frontière ville-campagne, des zones plus fraîches au sein de l'îlot au-dessus des parcs urbains de même qu'une zone plus intense au-dessus du centre ville. La Figure 1.13 présente l'allure de l'îlot de chaleur montréalais. En l'absence de changement de temps synoptique, on observe un rythme diurne bien organisé avec le pic de l'îlot se produisant 3 à 4 heures après le couché du soleil et le minimum atteint en cours d'après midi lorsque la turbulence est bien développée. La Figure 1.14 montre cette évolution diurne de l'intensité de l'îlot pendant l'été et l'hiver respectivement. Ce phénomène est avant tout d'échelle urbaine voire de micro échelle, niveau auquel nous n'allons pas dans notre analyse. Il ne nous importe donc pas ici de développer ces aspects mais

<sup>3</sup> Couche limite urbaine : Elle correspond à la couche limite atmosphérique mais au-dessus d'un milieu urbain, ce qui lui confère des caractéristiques particulières.

bien de comprendre leur impact sur la circulation locale voire de plus grande échelle. Par ailleurs, ce phénomène étant nocturne, il n'a probablement que peu d'influence sur le transport diurne du pollen à part lors de situation de persistance de cet îlot pendant la journée.

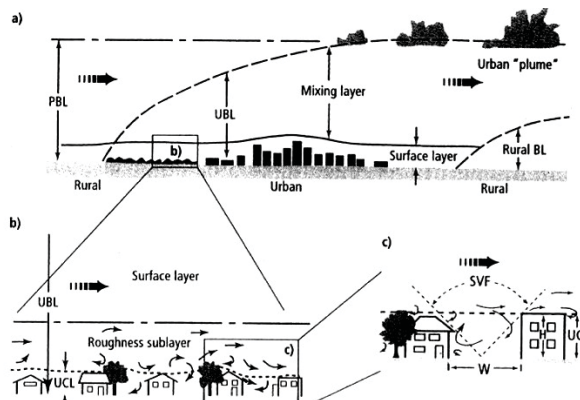


Figure 1.13 : Schéma idéalisé de la structure atmosphérique au-dessus (a) d'une région urbaine dans sa globalité, (b) d'une zone urbaine et (c) d'une rue canyon. D'après Oke (1984), revu en 1997

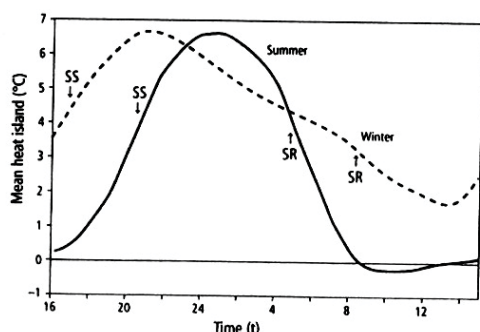


Figure 1.14: Variation temporelle de l'îlot de chaleur urbain d'Edmonton en hiver et en été. D'après Oke, 1997, adapté de Hage, 1972

L'excès de chaleur urbaine a entre autre effet de favoriser le développement de convection thermique entraînant à son tour un accroissement de la couverture nuageuse juste au-dessus ou sous le vent de la ville. Par ailleurs, la rugosité qui caractérise le centre-ville a tendance à jouer un rôle de frein vis à vis du vent régional qu'elle entrave et contraint à s'élever, générant alors de la friction et un peu plus de nuages. On peut parler de contrôles climatiques. La force de l'îlot dépend aussi des conditions du milieu rural environnant. En effet ce milieu est beaucoup plus susceptible au changement. Il est moins à l'abri. Suivant quelle sont les conditions thermiques qu'il expérimente, l'écart avec la ville sera plus ou moins grand. Lorsque les conditions sont calmes, la ville génère sa propre circulation d'air. Cette situation peut être très bien marquée la nuit lorsque de l'air rural plus frais vient alimenter le coeur de l'îlot. Cet air s'échauffe au contact de la surface ; étant plus chaud, il s'élève et rencontre alors des conditions stables associées à l'inversion d'altitude due au refroidissement radiatif nocturne de

l'air. Il est donc aussitôt limité dans son ascension et doit s'échapper latéralement, vers la zone rurale. Il se refroidit, sa densité augmente. Il est ensuite repris en charge par le flux d'advection en provenance du milieu rural (Figure 1.13). Cette circulation est un exemple typique de circulation fermée, en boucle. On note donc, en principe, des températures normalement plus élevées au centre ville que dans les régions rurales avoisinantes. Cette augmentation des températures affecte la turbulence et entraîne une modification de l'écoulement de l'air au-dessus de la surface urbaine.

On peut ainsi dire que le climat d'une ville est modulé par le climat local, régional et synoptique mais que chaque intervention dans le milieu urbain contribue en contre partie à modifier les conditions climatiques de plus grande échelle. Par ailleurs, la présence de ces conditions thermiques particulières peut avoir un effet non négligeable sur la persistance nocturne de quantités de pollen offrant alors des conditions plus inconfortables à la population urbaine.

## 2.2. Emission et déposition : initiation et fin de la trajectoire

Dans un premier temps, les facteurs météorologiques déterminent si le pollen sera émis ou pas (Raynor *et al.*, 1970). Si l'émission a lieu, son « timing » et son importance sont alors tout à fait dépendants des conditions du temps (Ogden *et al.*, 1969). Mais le comportement du pollen dans l'air est aussi fonction de caractéristiques qui lui sont propres et qui sont : taille, densité et forme. La vitesse à laquelle une particule de ce type se dépose s'appelle vitesse de sédimentation. Elle est fonction de son diamètre aérodynamique. Ce dernier correspond en fait au diamètre équivalent d'une particule qui aurait le même comportement mais serait sphérique et posséderait une densité de 1 gramme par cm<sup>3</sup> (Jones *et al.*, 2004). Le taux auquel une particule émise dans l'air va se déposer est fonction de sa vitesse de sédimentation. Le pollen est émis passivement dans l'atmosphère. De ce fait, sa libération est soumise à deux groupes de forces, de mouvements opposés dont nous reprenons la description de Jones *et al.* (2004). Le premier englobe des forces qui tendent à lier le pollen à son support d'origine, donc à l'empêcher de se détacher. On pense à la force électrostatique qui existe si le pollen et la surface sur laquelle il repose, sont chargés inversement. Il existe également une force de tension lorsque la surface en question est humide. Parmi les forces en faveur de l'expulsion du pollen appartenant donc à l'autre groupe, il y a la force de friction aérodynamique engendrée par le mouvement de l'air autour de la particule, ou encore l'entrechoquement de la particule avec d'autres particules. Ces forces sont des résultantes du vent, de l'impact de gouttes de pluie ou d'autres phénomènes physiques. Le pollen est donc soumis à l'ensemble de ces forces

et si leur bilan est positif, il parvient à se détacher de sa surface d'origine et se disperse dans l'air au grès des courants atmosphériques. Commence alors la phase de transport. Ce déplacement du pollen des sources vers les récepteurs est globalement caractérisé par les conditions prévalentes au-dessus de la dite région et définies par le type de temps. Les concentrations mesurées après un certain temps de transport, sont elles-mêmes le résultat de la combinaison de courants de sédimentation et de la stabilité atmosphérique qui soit, le maintient en suspension soit, le précipite vers la surface. En résumé, les concentrations de pollen sont le résultat de l'association à la fois des conditions à la date de l'émission et de celles ayant prévalu antérieurement et encore ressenties.

i. Facteurs influençant la production et l'émission du pollen

Seuls 10% des 300 familles de plantes à fleurs sont adaptées à la pollinisation anémophile (Powell, 1993). Cette adaptation se fait par le biais de la taille, d'une production pollinique accrue de même que par la présentation des organes mâles (stigmates) au contact de l'air. Ainsi Know (1979) explique qu'un hectare de culture de seigle libère pendant une saison pollinique l'équivalent de 210 kg de pollen soit entre 2 et 5 millions de grains de pollen de chaque fleur alors que dans le cas de plantes pollinisées par les insectes, ce montant s'élève à moins d'un millier de grains. Les insectes et les abeilles sont de bien meilleurs pollinisateurs que le vent... La quantité globale de pollen produite pendant une saison est modulée par les conditions environnementales printanières plus ou moins favorables au développement de la plante. Les résultats sont variés suivant les régions étudiées. Ainsi Raynor et al. (1970) montrent que la sécheresse printanière à Long Island (Etat de New York) a entraîné en 1967 une forte chute du nombre de plants d'ambrosie durant cette année-là qui s'est ensuite répercutée sur les quantités mesurées dans l'air. En 1980, à Tulsa (Oklahoma), Buck et al. (1982) font la même constatation. Ensuite, la libération du pollen par la plante, à proprement parler, est un processus purement physique (Edmonds, 1979). Les anthères sur les longs filaments sont bien exposées aux vibrations et aux mouvements résultants du vent de manière à faciliter la prise en charge par le vent du pollen. C'est la déshydratation des sacs de pollen qui entraîne leur ouverture et la libération du pollen. Cette déhiscence des anthères est induite par des changements de la température de l'air (forte croissance selon Laaidi et al., 1997), du taux d'humidité relative et du moment de la journée (Holmes et al., 1963). L'ouverture de ces sacs est également contrôlée par la pression atmosphérique qui doit être élevée (Laaidi et al., 1997). Seul le temps chaud et sec rend possible la pollinisation de la sorte. Selon Bianchi (1959), l'émission sera d'autant plus forte que les températures seront élevées. Ce processus est suivi d'une déposition partielle sur les surfaces adjacentes à la

plante. La prise en charge par l'air du pollen est ensuite le fait du vent et notamment de la turbulence. C'est le levé du jour qui initie la libération du pollen (Payne, 1967). Un bon ensoleillement associé à des températures douces favorise l'émission du pollen. Selon Ogden et al. (1969) l'émission du pollen d'ambrosie pendant la nuit n'a jamais été observée lorsque celle-ci est très stable, fortement humide et faiblement venteuse. Les périodes de concentrations maximales d'ambrosie sont directement liées à des maxima de turbulence. De nombreux auteurs tels que Smart et ses collaborateurs (1979) montrent une corrélation positive significative entre de fortes concentrations polliniques et des journées de forts maxima de température. Les quantités de pollens de Graminées mesurées sont positivement corrélées avec l'ensoleillement et la température alors que des relations inverses sont mises à jour avec les précipitations, l'humidité relative, la convection et la vitesse du vent (Hyde et al. 1945; Hirst 1953; Davies et al. 1973). En 1986, Fishbach montre qu'une journée chaude, sèche et venteuse a pour effet d'accroître de 2 à 4 fois les quantités d'ambrosie retrouvées dans l'air par rapport à la distribution gaussienne moyenne alors que l'humidité et des vents de moindre vitesse ont pour effet de les réduire de moitié. En fait, les variables atmosphériques qui contrôlent le processus de l'émission sont toutes relatives à la désintégration de l'inversion thermique nocturne. Une fois que l'émission a commencé, à moins que la pluie ne vienne la perturber ou que le vent ne tombe complètement, elle se poursuit jusqu'à atteindre son pic suivi du déclin. Le pollen que l'on trouve par la suite, peut être issu d'une remise en suspension de pollen qui s'était déposé sur les feuillages environnants ou provenir de sources plus lointaines. Les 4 points suivants résument le rôle des 4 principaux paramètres météorologiques durant l'émission.

✓ *Rôle de la température*

La température minimale nocturne affecte le développement des anthères. Dans le cas de l'ambrosie, Sheldon et al. (1959) ont montré que des températures inférieures à 4°C ont pour effet d'inhiber totalement ce développement et ceci pour plusieurs jours. Dans le cas de températures minimales nocturnes de l'ordre de 15°C, il faut qu'elles soient suivies d'une augmentation d'au moins 14°C pour permettre l'anthèse. Enfin dans le cas d'une température estivale nocturne normale d'environ 20°C suivie d'une température diurne de 24°C, la situation est idéale pour l'anthèse. Dans le cas de l'ambrosie, ce phénomène est vraiment relatif à la température de l'air comme c'est le cas des plantes anémophiles qui libèrent leur pollen plutôt après le levé du soleil et ensuite en conditions de températures chaudes seulement.



✓ *Rôle de l'humidité relative*

Une fois les conditions de température minimale nocturne réunies, le second paramètre clé est l'humidité relative. Selon Sheldon et *al.* (1959), l'anthèse n'a lieu que si l'humidité relative est inférieure à 80%. L'ouverture se fait graduellement à partir de 70% (50% achevés après 3 heures) puis s'accélère plus l'air s'assèche (90% sont ouvertes après 2.17 heures si HR=60% et après 1.17 heure si HR=20%). A Greenbay, Fishbach (1976b) trouve que les conditions les plus favorables à la libération du pollen sont celles relatives à des températures du point de rosée situées au-delà de 15.5°C et des vents plus forts que 10 mph (> 4.47 m s<sup>-1</sup>), généralement associés à un régime de vent de Sud à Ouest. Inversement les journées de moindre pollinisation sont à attribuer à des températures du point de rosée plus basses de même que lorsque la température de l'air et la vitesse du vent correspondent à des situations extrêmes avec pluie ou sans vent. Il retient également que des conditions chaudes, sèches et venteuses peuvent augmenter de 2 à 4 fois les valeurs attendues selon la courbe gaussienne alors que des conditions humides et moins venteuses peuvent les réduire de plus de la moitié. D'après Powel (1993), la distribution verticale de la température est déterminante de la libération et de la dispersion des particules polliniques. Il explique les anthèses subites par de rapides changements de la température et de l'humidité qui catapultent littéralement le pollen dans l'air. Ainsi, lorsque les conditions atmosphériques idéales sont réunies, la sécheresse requise pour permettre l'éclatement des étamines et donc la libération du pollen fait immédiatement suite à l'augmentation de la température de l'air qui suit le levé du soleil.

✓ *Rôle du vent*

Le vent et son régime sont également des paramètres déterminants. En effet, si la libération du pollen a lieu par temps calme, les concentrations polliniques mesurées dans l'air demeurent faibles du fait que celui-ci ne peut s'échapper des surfaces adjacentes aux fleurs sur lesquelles il s'est déposé, la plupart du temps en grappe, lors de son expulsion (Edmonds, 1979). Une fois que le vent dépasse 3 à 4 m s<sup>-1</sup> alors ce dernier peut être pris en charge par le flux d'air. Si la vitesse du vent atteint 10 à 20 m s<sup>-1</sup> pendant l'anthèse, alors aucun délai n'est observé entre les quantités émises et les concentrations mesurées dans l'air. Cependant, il faut savoir que même par vent fort, Sheldon et *al.* (1959) indiquent que seulement 6% du pollen émis par un buisson d'ambrosie ne sont réellement mis en suspension. Raynor et *al.* (1972) effectuant le même type de recherche dans un champ de maïs, s'aperçoivent que seulement 1/3 du pollen émis par la culture en question s'échappe effectivement de la zone cultivée. Certains auteurs estiment entre 0.3 et 1 m s<sup>-1</sup> le seuil minimal du vent permettant l'expulsion. Finalement, nous pouvons

dire que la quantité de pollen émis qui sera effectivement prise en charge par l'atmosphère est fonction non seulement de la force du vent mais aussi de la turbulence atmosphérique, de la hauteur à laquelle a effectivement lieu l'émission ainsi que de la densité de la végétation des alentours. De manière générale, les comptes polliniques demeurent plus importants à proximité du sol et près du point d'émission puis diminuent exponentiellement avec l'altitude.

Bien qu'ayant traité les trois paramètres météorologiques déterminants de l'émission du pollen, il est indispensable d'en citer un quatrième plutôt surprenant mais déjà vérifié à plusieurs occasions par plusieurs chercheurs et qui peut aussi jouer un rôle crucial au cours de cette première étape de la trajectoire aérobiologique. On associe toujours la pluie au lessivage de l'air donc à l'élimination du pollen ainsi qu'à l'arrêt de l'émission par la plante (Hyde, 1952 ; Mc Donald, 1980). Or le contraire est aussi parfois vérifié.

✓ *Rôle des précipitations*

Dans leur étude sur l'incidence de l'augmentation des concentrations de pollen au cours des précipitations à Londres, Norris-Hill et *al.* (1993) mettent en évidence plusieurs occasions au cours desquelles les concentrations augmentent de façon accrue au cours des deux premières heures des précipitations. Considérant les autres facteurs intervenant durant ces événements, les auteurs suggèrent de considérer avec attention le régime des vents prévalents. En effet, certains vents forts à la surface peuvent avoir pour effet de faciliter la libération du pollen. Ils peuvent aussi influencer la quantité d'air qui pénètre dans la fente de l'échantillonneur à pollen de type Burkard, trompant quelque peu les mesures. Cependant, ces phénomènes devraient avoir lieu au cours de n'importe quel événement pluvieux. Or, ce n'est pas le cas. Les auteurs de cette recherche finissent par mettre en évidence que ces observations sont toujours associées à des orages de forte intensité (plus de 5 mm h<sup>-1</sup>), de moins de 6 heures et qui ont lieu lors de conditions anticycloniques par temps chaud (T > 25°C). Il s'agit donc d'orages de type convectif plus que des pluies d'origine frontale stratiformes et moins intenses. Le fait que cette étude ait été faite en ville apporte aussi un élément de réponse. On sait que la ville génère d'elle-même des conditions atmosphériques particulières. Du fait de sa structure et des matériaux qui la composent, elle est généralement plus chaude que les environs et les vents y sont en principe moins intenses le jour comme le montre Chandler (1965) dans le cas de Londres. Cette augmentation de la température a pour effet d'accroître les mouvements convectifs et donc le régime turbulent de la couche limite atmosphérique urbaine et par le fait même, entraîné une augmentation de la fréquence des pluies convectives (Cas de Saint Louis, Projet Metromex, Changnon, 1978).

Ces mouvements convectifs transportent quant à eux très haut dans l'atmosphère les particules en suspension. Lorsque l'orage convectif se développe, il s'en suit une subsidence très forte de l'air qui ramène alors à la surface de façon tout à fait brutale, le contenu atmosphérique. Cette augmentation des concentrations polliniques mesurées est alors de courte durée (au plus deux heures) suit ensuite une décroissance résultant de l'effet de la dilution dans un plus grand volume d'air sous l'effet de la turbulence, ou de l'effet du lessivage. Les auteurs font aussi état de la taille des gouttes d'eau de ce type d'orage qui sont particulièrement grosses et laisseraient de ce fait plus de particules en suspension que lors de pluie fine et plus diffuse. En dépit de la courte durée de tels événements, plusieurs études tendent à établir une bonne relation entre certains types d'orages et l'augmentation de la fréquentation des centres d'urgence respiratoire. Dans la grande région londonienne (Venables et al., 1997) et à Salamanca en Espagne (Igea et al., 2003) une relation assez claire est établie entre un orage de printemps et l'augmentation des admissions pour asthme aux urgences. Gehrman (2003) rapporte les travaux de Rogers à Paris, où le nombre de visites chez le médecin pour crise d'asthme augmente pendant les orages durant la saison des graminées. Le paramètre météorologique alors en cause est toutefois principalement le facteur vent puisque la corrélation est la plus forte pendant le pic de vent. Les auteurs émettent l'hypothèse que de grandes quantités de pollen de graminées avaient probablement été émises la veille de l'orage et s'étaient déposés au sol, lesquelles ont été, au moment du passage du front d'orage, remis en circulation. Ils soulèvent aussi la possibilité que le vent lui-même ait contribué à libérer plus de pollen. L'étude de Gehrman (2003) fait référence à un autre phénomène qui est lié au fait que l'air étant plus humide, le pollen gonflé d'eau, expulse dans l'air des quantités abondantes de constituants polliniques fortement allergéniques de très petite taille qui peuvent alors pénétrer profondément dans le système respiratoire.

✓ *Rôle des situations météorologiques*

Finalement, il semble que les conditions les plus défavorables à l'émission et à la mise en suspension du pollen, correspondent à des situations de basse pression qui initient des écarts thermiques diurnes de faible ampleur et une humidité relative ambiante relativement élevée. A l'inverse, les conditions a priori les plus propices sont caractérisées par des conditions de nature plutôt anticyclonique générant une inversion thermique nocturne accompagnée d'air calme et occasionnellement de brouillard. Après le lever du soleil, l'énergie solaire reçue à la surface entraîne une augmentation rapide de la température comme nous pouvons bien le voir sur la figure 1.4 accompagnée d'une intensification de la turbulence de l'air et d'une diminution de l'humidité relative.

Nous retenons que l'émission du pollen dans l'air est le résultat de la conjonction d'un ensemble de processus eux-mêmes initiés par des paramètres environnementaux différents les uns des autres mais tous étroitement liés entre eux. D'après Raynor et al. (1970) l'influence des conditions atmosphériques sur l'émission, le transport et l'élimination du pollen est centrée sur les conditions de température, humidité et de vent. L'air sec augmente l'évaporation de l'humidité des anthères de la plante et la turbulence due au vent entraîne la prise en charge et la dispersion du pollen. Dans le cas de l'ambrosie, Ogden et al. (1969) ont donc montré que le pic d'émission avait lieu en début de journée (Figure 1.4). Il n'est pourtant pas exclu d'en observer un autre plus tardif dans l'après midi. Giner et al. (1999) l'associent soit à de l'advection de pollen de sources lointaines, soit à de la remise en suspension de pollen local déjà déposé sous l'effet du vent.

ii. Facteurs gouvernant l'élimination et la déposition du pollen

Un pollen qui a été émis dans l'air puis transporté sur une certaine distance, va à un moment ultérieur rencontrer des conditions atmosphériques ou physiques du milieu qui vont faciliter son élimination. Les premières pertes sont celles qui se produisent à proximité de la source d'émission. Les études déjà citées de Raynor et al. (1970 ; 1968 ; 1965) fournissent un certain nombre d'information quant à cette part de pollen éliminée immédiatement à l'émission. Presque 80% des grains émis se déposent à moins de 500 m de leur source de même qu'environ 20% à moins de 10 Km (Laaïdi et al., 1997). On admet une vitesse de chute comprise entre 9 et 80 mm s<sup>-1</sup> si bien que leur rayon d'action ne dépasserait pas plus de quelques centimètres de la plante (Laaïdi et al., 1997). C'est le développement des expériences en tunnel de vent qui a permis d'étudier plus en détail ces processus. On peut dire que les principaux moyens de déposition dans la nature sont soit l'impaction, la sédimentation, les échanges avec la couche limite, la déposition turbulente, l'effet du lessivage ou encore la déposition électrostatique (Gregory, 1973).

Une part des pollens se dépose sous l'effet de la gravité en commençant par ceux qui se trouvent à la base du nuage. La concentration de la base du nuage se rétablit au fur et à mesure par diffusion. Si les grains de pollens ainsi éliminés quittent la couche turbulente et se retrouvent dans la couche laminaire de surface alors ils n'ont plus guère de chance d'être remis en suspension par la suite. Ils sédimentent sous l'effet de la gravité et de la friction puisque leur vitesse de chute est constante. Ce mode d'élimination est généralement associé à des conditions atmosphériques absolument stables par nuit claire lorsque la surface du sol est refroidie sous l'effet des pertes radiatives importantes, alors la couche laminaire stable

tend à se développer potentiellement sur plusieurs mètres vers le haut. La sédimentation est un processus de couche laminaire. Les expériences en tunnel de vent montrent qu'elle tend à diminuer lorsque la vitesse du vent est de 2 m s<sup>-1</sup> et plus. La déposition turbulente est quant à elle fonction de la vitesse du vent. Lorsque la vitesse se situe entre 5 et 10 m/s, la quantité de pollen que l'on peut trouver sous une surface telle une feuille est quasi aussi importante que sur la face supérieure de cette surface.

La déposition électrostatique est liée au fait que toute particule possède une charge électrique. Toutefois d'après Gregory (1973) son effet est certainement très limité à part lorsque la particule en question se trouve à très grande proximité d'une autre de charge inverse. Borra et *al.* (1992) font mention de ce phénomène et montrent qu'un gradient de potentiel positif est nécessaire à la bonne dispersion d'un nuage de pollen lequel est systématiquement chargé négativement. En revanche, les auteurs notent qu'en période d'orage, ce gradient s'inverse et les mesures de pollen faites dans ces conditions sont toujours très faibles même si les conditions de bonne dispersion des grains sont réunies.

Enfin les conditions hygrométriques ont aussi un effet sur les particules en suspension. En effet, plus grand est le contenu en eau de l'atmosphère, plus lourdes sont les particules du fait de leur caractère hygroscopique (affinité avec l'eau) (Laaidi et *al.*, 1997). Par ailleurs, lorsque ce n'est plus une question d'humidité mais bien de précipitation, on parle de lessivage. Les précipitations ont pour effet d'induire un appauvrissement de l'air en particules en suspension. Très tôt, Miquel (1878-1899) avait ainsi observé que les quantités retrouvées dans l'air du Parc Montsouris à Paris (France) étaient plus faibles en période de précipitation par rapport à celles obtenues en conditions sèches. Hyde (1952) de même que Mc Donald (1980, 1964) ont montré que 10 mm de précipitations lessivent plus de 96% du pollen contenu dans l'air et jusqu'à 99% si ces gouttelettes passent de 4 à 0.2 mm de diamètre. En effet, celles-ci ont un effet de lessivage permettant l'élimination mécanique du pollen. Smart et *al.* (1979) notent la même corrélation positive significative entre de moindres comptes polliniques de graminées à Melbourne en Australie et des conditions plus humides voire pluvieuses. Une goutte de pluie demeure relativement stable jusqu'à ce qu'elle atteigne un diamètre d'environ 5 mm après quoi elle explose et forme 2 gouttelettes de toute petite taille. La vitesse terminale des gouttes varie entre 2 et 9 m s<sup>-1</sup>. Il est également important de noter le phénomène de « rain-out » par lequel les particules en suspension agissent comme noyaux de condensation et sont par là même éliminées.

Ainsi, selon le niveau considéré dans l'atmosphère, les particules en suspension vont être affectées par tel ou

tel mécanisme d'élimination. A proximité de la source, si elle se trouve à grande proximité du sol, l'impaction et les phénomènes d'échanges de couche limite sont déterminants. C'est plus souvent le cas pour les spores que pour les pollens qui sont émis en général à une certaine hauteur au-dessus du sol. Ensuite, plus le nuage diffuse dans l'atmosphère et prend de la hauteur, plus les précipitations ont un impact. De plus, la végétation constitue un filtre de première importance. Les irrégularités du terrain peuvent évidemment aussi jouer un rôle de barrière et s'opposer au passage des particules. Heise et *al.* (1957) ont montré que le milieu plus chaud généré par la ville entraîne des mouvements ascendants qui empêchent inversement l'élimination du pollen d'ambrosie.

### 2.3. Transport : étape centrale de la trajectoire

Le nuage pollinique tel que défini par Gregory (1973) résulte d'une source unique. Sa taille et sa largeur sont fonction de la taille et de la nature de la source (Kramer et *al.*, 1987). Dans notre cas, nous entendons par nuage pollinique, une masse d'air, d'assez grande envergure, en déplacement et chargée des pollens émis dans la grande région de Montréal. D'un point de vue épidémiologique et médical, la connaissance des facteurs qui influencent le devenir des grains de pollen est vraiment importante pouvoir prévenir les patients allergiques des risques encourus. En effet, si le pollen sédimente rapidement alors ses effets sont de moindre envergure. C'est ce qui arrive pour une assez grande part du pollen d'ailleurs puisque une très faible part seulement de la quantité totale de pollen émise dans l'atmosphère voyagera effectivement (Cole et *al.*, 1967). Selon Dingle et *al.* (1959), ce ne sont que 6% des quantités émises qui vont réellement être transportées à distance de la source d'émission. Toutefois ceci est sans compter sur la turbulence atmosphérique même si faible soit elle pour maintenir en suspension ces grains. Ce faible pourcentage n'en demeure pas moins dommageable pour les allergiques étant donné le très fort degré allergénique de l'ambrosie. Par ailleurs, une autre part de ces quantités rapidement déposées peut éventuellement aussi être remise en suspension au cours des heures suivant la déposition si les conditions atmosphériques le permettent (Jones et *al.*, 2004 ; Nicholson, 1988a). En revanche, une infime partie restante peut s'élever à 2000 m d'altitude et parcourir près de 800 km en 24 heures (Laaidi et *al.*, 1997).

Enfin, du fait que la circulation dans les bas niveaux de l'atmosphère est directement sous l'influence de la surface et du milieu, il est absolument nécessaire de considérer le milieu étudié. Dans le cas de cette étude, la grande région de Montréal offre des conditions de surface variées dont une forte proportion urbaine. Un centre urbain du fait de sa rugosité ainsi que des matériaux qui le compose a un impact indéniable sur la circulation

atmosphérique régionale (section 1.3.2.3). Un certain nombre d'études se sont intéressées à cet impact sur les concentrations de pollen et leur dilution. Nous pouvons entre autres citer celles de Raynor *et al.* (1970) ; Gregory, (1978) ; Hjelmroos, (1991) ; Bourgeois *et al.*, (1985).

#### i. Notion de transport passif

La mise en suspension et le transport du pollen d'ambroisie sont inhérents à la fonction biologique de la plante et à ses caractéristiques. L'énergie requise pour le maintenir en suspension c'est à dire lutter contre la gravité et le transporter, est fonction de son poids, de sa taille et de sa forme. Les particules les plus petites peuvent être transportées au-delà de la tropopause suivant les mêmes processus de diffusion turbulente que le sont les gaz si les conditions atmosphériques le permettent. Ce pollen est ainsi passivement transporté par l'atmosphère dans un but de reproduction. Le mot « passivement » exprime le fait qu'il n'existe pas de patron cohérent et régulier des mouvements de chacun des grains de pollen considérés ; chaque étape de son transport est aléatoire tant en durée qu'en direction (Edmonds, 1979). Cet effet de hasard est le résultat des fluctuations propres au flux d'air de la basse atmosphère. Les particules aéroportées participent à ces mouvements chaotiques au même titre que si elles étaient parties entières du flux lui-même. Toutefois, une relative cohérence peut apparaître en moyenne du fait que l'atmosphère elle-même possède des moyennes physiques significatives en fonction du temps et de l'espace telles que la direction et la vitesse moyennes de vent.

Les conditions météorologiques du moment, de même que celles qui précèdent l'évènement pollué, déterminent les quantités de pollen que l'on retrouve dans l'air mais aussi la réponse des personnes allergiques (Cole *et al.*, 1967). Le transport se fait sous l'effet du vent et de la turbulence engendrée par convection ou mécaniquement. Ces cellules turbulentes sont dépendantes du taux de réchauffement à la surface, de la rugosité de celle-ci, du cisaillement du vent en altitude et du profil de la température dans la couche limite atmosphérique (Chatigny *et al.*, 1979). Pendant la saison de pollinisation de l'ambroisie, le pollen est émis en quantité par de nombreuses sources ponctuelles qui contribuent toutes pour ainsi dire à une concentration de fond qui prend le dessus sur d'autres sources ponctuelles distantes d'au moins 100 mètres (Cole *et al.*, 1967). En terme d'échelles de transport, on remarque qu'elles peuvent varier de très petites à plusieurs centaines, voire des milliers de kilomètres. Dans la mesure où ce transport est passif, nous n'avons aucun moyen de contrôler le temps réellement consacré à voyager. Ce qui détermine en partie la longueur du voyage est le temps durant lequel le grain de pollen se trouve en situation de flottaison. Le transport horizontal peut être estimé à partir d'un gradient de pression à la surface alors que la diffusion elle, est de trop petite

échelle pour être traitée par les équations du mouvement. Les investigations théoriques et expérimentales nous permettent de dire que la diffusion turbulente est fonction du gradient vertical de la température, de la rugosité du sol et du cisaillement du vent vertical. Les particules plus grandes, plus lourdes présentent une inertie (i.e. masse) qui ne leur permet pas de répondre à la plupart des mouvements turbulents rapides. De ce fait, les particules de cette catégorie de taille sont généralement plus vite éliminées du flux d'air. Plus une particule est petite et légère, plus elle a la possibilité de s'élever en altitude dans l'atmosphère et voyager sur de plus longues distances. Les particules plus lourdes n'ont pas cette « chance » à part lors de conditions très particulières. Il est par ailleurs nécessaire de faire la différence entre dilution ou diffusion et transport. En effet, lorsque des tourbillons de turbulence se produisent au sein d'un nuage de pollen, ils ont pour effet d'induire la dilution du contenu en favorisant le mélange des particules dans un plus grand volume d'air. Si en revanche, les mouvements atmosphériques sont de plus grande envergure que le nuage lui-même, on parle alors de transport car seule l'influence de l'advection domine (Taylor, 1938). On peut ici citer le principe même de l'hypothèse de Taylor, qui à des fins de simplification en vue de décrire l'instabilité de l'air, affirme tout en sachant que cela est faux, que : « *la variation dans le temps de n'importe quelle variable telle le contenu en pollen de l'air est uniquement fonction des termes d'advection dans le cas où les tourbillons de turbulence nécessitent plus de temps pour se développer que le temps pris par l'air pour être enregistré par le senseur* ». Cela revient à dire dans le cas du pollen que si les tourbillons de turbulence sont de taille inférieure à celle du nuage de pollen alors ils tendent à le diluer alors que s'ils sont plus grands, ils le transportent et celui-ci s'étire dans l'espace. De manière typique, dilution et transport ont lieu de manière simultanée. Le nuage de pollen est ainsi transporté horizontalement, verticalement ou dans les deux directions en même temps (Oke, 1987; Stull, 1989). Lorsque le vent souffle, les pollens au même titre que n'importe quel autre polluant, diffusent à la fois le long de la direction dominante du vent mais aussi dans la verticale grâce à la diffusion turbulente. Ainsi on peut affirmer que plus le vent est fort, plus le volume d'air traversant le nuage est grand et donc petite est la concentration par unité de volume. C'est aussi la vitesse du vent qui détermine la part de convection forcée due à la fois au cisaillement entre les couches d'air ainsi qu'entre l'air et la surface. Dans ces conditions, plus la vitesse du vent est grande, plus l'activité turbulente est importante. Le transport quant à lui résulte plus précisément de la direction du vent qui est en perpétuel changement. Sur une période de 1 heure, ces variations peuvent équivaloir un angle de 30 à 45° centré sur la direction moyenne du vent. En plus du transport en tant que tel, la direction du vent détermine aussi le chemin qu'empruntent les pollens, ce qui a un impact sans conteste sur les récepteurs



selon qu'ils se situent ou non sur le parcours du nuage de pollen (Oke, 1987). Enfin, Fraile et *al.* (2004) rapportent un autre facteur pour caractériser le transport. Il s'agit de la formation et de la dissipation du couvert nuageux. En effet, les nuages régulent entrée et sortie d'énergie dans le système atmosphérique et ont ainsi la capacité de modérer le déplacement des masses d'air. De plus il est aussi possible d'envisager les précipitations comme mode de transport vertical mais orienté vers le bas.

Une décomposition des échelles de transport atmosphérique (Figure 1.15) est proposée dans Oke (1987). La plus fine échelle, micro échelle, se caractérise par des phénomènes ne durant pas plus de 1 heure et a lieu sur quelques centaines de mètres seulement. Il est préférable que la turbulence y soit homogène de manière à ce que puisse durer le phénomène en question comme le transport du pollen. A méso échelle, le transport se fait pendant quelques jours et la distance peut atteindre quelques centaines de km. Au même titre que la micro échelle, les phénomènes ayant lieu à cette échelle, se produisent dans la CLA et sont soumis aux rythmes diurnes de cette couche d'air. La grande échelle, que l'on peut aussi définir comme étant l'échelle régionale est conditionnée par la circulation atmosphérique synoptique. Les pollens sont pris en charge par les grands systèmes atmosphériques et voyagent sur de très longues distances durant plusieurs jours.

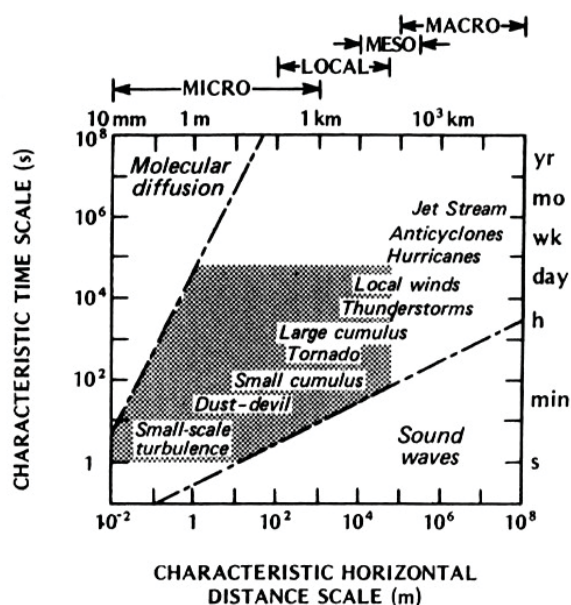


Figure 1.15 : Echelle spatio-temporelle des différents phénomènes atmosphériques. La partie hachurée représente le domaine caractéristique des phénomènes de la couche limite atmosphérique. D'après Smagorinsky (1974) et modifié par Oke, 1987

✓ *Transport horizontal*

D'après Solomon (2003) les caractéristiques

morphologiques des pollens étudiés sont les facteurs les plus déterminants de l'émission, du transport et de la déposition des bio-aérosols. On s'attend en effet à ce que les plus légers et les plus aérodynamiques aient plus de chance d'être transportés que les autres, ce qui n'est pas pour autant toujours vérifié. On réalise par le même fait que les pollens à risque ne sont donc pas toujours des pollens locaux. C'était le cas à Vienne dans les années 80, où Jäger (2000) signalait des pics d'ambrosie à minuit, lequel pollen venait nécessairement de Hongrie (depuis la plante s'est elle-même installée à raison de 6 à 20 km an-1).

Il est en général observé une diminution rapide de la concentration en pollen sous l'effet du mélange turbulent plus on s'éloigne de la source, et ceci dès une centaine de mètres (Gregory, 1961). Toutefois, parmi le pollen qui se maintient le plus longtemps dans l'air, un certain nombre va pouvoir voyager sur de plus ou moins longues distances selon les conditions atmosphériques rencontrées. Plusieurs auteurs en ont fait l'évidence. Une étude menée dans les Pays Baltes par Saar et *al.* (2000), fait état d'incursions de pollen d'ambrosie en provenance d'Ukraine de même que de régions européennes situées au SO voire plus au S aussi. Ces arrivées de pollen sont toujours associées à de puissantes hautes pressions centrées sur l'Europe Centrale et s'étirant jusque dans les Pays Baltes. Cecchi et *al.* (2005) arrivent à identifier du pollen d'ambrosie bulgare mesuré dans la région de Florence alors que la plante est absente de cette région. En Catalogne, Belmonte et *al.* (2000) font part d'un évènement d'ambrosie particulier en 1996 et l'associe à du transport longue distance en provenance de la vallée du Rhône en France issu de conditions atmosphériques très inhabituelles. En Suède (Dhal et *al.*, 1999) mettent en évidence la présence de pollen d'ambrosie en provenance du Sud et sont à peu près assurés d'une augmentation à venir de ce type d'intrusion du continent du fait de la propagation hallucinante de la plante en Europe. En Bourgogne, Laaidi et Laaidi (1999) font état d'un double rythme au sein des concentrations d'ambrosie mesurées localement. Le pic du matin est un pic local alors qu'un autre apparaît plus tard dans la journée et celui-ci est issu de flux du Sud- Sud ouest provenant de la région lyonnaise. Cette liste est non exhaustive mais se veut informative. L'objectif n'est pas de faire un recensement complet de ces études mais d'en donner une bonne représentation.

De nombreuses autres études existent encore à propos du déplacement d'autres types de pollen que l'ambrosie. On peut citer Campbell et *al.* (1999) qui font état de pollens voyageurs retrouvés en Arctique, de même que Comtois (1997) qui met en évidence sur la côte Est de la Baie d'Hudson, la présence de pollen d'arbres thermophiles dont les premières sources se trouvent à plus de 1000 Km du point de mesure. Rogers et *al.* (1998) confirment

l'arrivée de pollen de cèdre des montagnes à Tulsa de provenance lointaine du Sud. A Nuuk, au Groenland, Porsbjerg et *al.* (2003) identifient la présence de certains pollens provenant du Canada. En 1997, Cabezudo et *al.* signalent l'observation sur la Costa Del Sol dans le Sud de l'Espagne, de concentrations sporadiques et toujours en après midi de pollen de *Cannabis sativa* L.. L'analyse des conditions atmosphériques prévalentes ces jours-là, permettent de les associer à une circulation de l'Afrique du Nord vers le Sud de l'Espagne. Le calcul de trajectoires les amène même à localiser comme source potentielle des plantations de marihuana dans le Nord Marocain. Nous pouvons encore énumérer les travaux de Hjelmroos (1992) sur le transport du pollen de bouleau, ceux de Mandrioli et *al.* (1980) sur le transport du pollen de noisetier durant l'hiver, ou encore ceux de Mandrioli et *al.* (1982) concernant du pollen yougoslave retrouvé dans la plaine du Pô, de même que ceux de Peeters et *al.* (1988) s'intéressant au transport de pollen de châtaignier en Suisse, de même que ceux de Rantio-Lehtimäki (1994) et Rantio-Lehtimäki et *al.* (2004) à propos des échelles de transport de pollen et des questions de viabilité et d'allergénicité des pollens « voyageurs » et pour finir, ceux de Tampieri et *al.* (1977) concernant le transport de moyenne échelle.

En 1966, Janssen a élaboré un modèle théorique de dispersion pollinique selon lequel la concentration pollinique est inversement proportionnelle à la distance à la source. Il subdivise cette fonction en trois étapes, chacune représentative d'une provenance potentielle des pollens, de la source locale, à la source extra locale puis encore plus lointaine, l'apport régional. Cependant Comtois (1983) précise que du fait que la pollinisation anémophile est très efficace et que la végétation occupe l'espace à l'infini offrant ainsi un nombre de sources potentielles infini, les différents apports polliniques représentent en fait un continuum. Certains milieux naturels tels que les chaînes de montagne, les océans et les déserts peuvent jouer le rôle de barrière à la dispersion.

Dans la couche limite atmosphérique, le transport implique donc un flux d'air plus ou moins laminaire qui rend possible « le déplacement » du pollen sur une plus ou moins longue distance par rapport à sa source. Il faut tenir compte de la vitesse du vent mais aussi du régime de son écoulement (Oke, 1987) qui détermine l'état de l'atmosphère. L'étude récente de Damialis et *al.* (2005) porte sur le vent sous ses trois formes : vitesse, direction et persistance. Le vent est en effet le principal reflet du déplacement de masses d'air, résultat de la circulation atmosphérique de méso échelle voire d'échelle synoptique sous l'effet, par définition, du gradient de pression. Il transporte le pollen selon son axe dominant. Dans la CLA, il est largement contrôlé par la friction. Ce frottement a pour effet de retarder le flux d'air, de le ralentir, ce qui donne lieu à une forte diminution de

la vitesse moyenne. Le vent moyen demeure constant au sommet de la couche limite atmosphérique une fois seulement que l'effet de la surface ne se fait plus sentir (Oke, 1987). Il est bien clair que cet axe est perturbé selon les milieux qu'il traverse. En l'absence de fort effet thermique, il est clair que la profondeur de mélange ( $z_i$ ) est fonction de la rugosité de la surface. La vitesse présente un profil logarithmique avec l'altitude, la vitesse au niveau  $z_g$ , au sommet de la CLA est toujours constante puisque l'effet de la surface ne se fait plus sentir. La direction du vent détermine sa trajectoire. Fishbach et ses collaborateurs (1975, 1986) attribuent les variations observées des concentrations mesurées d'ambrosie à la direction du vent, donc à l'emplacement de la source par rapport au site d'échantillonnage, relation déjà établie précédemment par Davies et ses collaborateurs (1973). Dans son étude à Greenbay, Wisconsin, déjà mentionnée, ces valeurs peuvent passer de 2 à 4 fois la valeur moyenne mesurée lorsque le vent tourne du Sud à l'Ouest. Cette observation rend certaines sources plus importantes que d'autres et confirme la nécessité d'analyser la provenance des vents dominants pour une région donnée durant la saison de pollinisation d'ambrosie afin d'améliorer la compréhension que l'on a du rôle des principales sources de pollen (Jäger, 2000 en Autriche ; Makra, 2004 en Hongrie ; Giner et *al.*, 1999 en Espagne ; Damialis et *al.*, 2005 en Grèce). Raynor et *al.* (1965, 1968, 1970) ont beaucoup travaillé sur ces questions de diffusion horizontale. A partir de mesure in situ, ils ont évalué en amont et en aval d'une source d'ambrosie ce qui se passait. En amont de la source la mesure est représentative des concentrations régionales, soit la mesure de fond. Sous le vent de la source s'ajoute la contribution locale. Ils ont estimé que l'effet de la source se faisait sentir jusqu'à 800 mètres en aval de celle-ci. Ainsi la concentration de fond est multipliée par 100, à 30 mètres sous le vent d'une source de 800 m<sup>2</sup> de surface. Cependant après 150 mètres sous la source, les concentrations de fond redeviennent semblables à ce qu'elles étaient avant le passage de la source. Il semble donc que les petites sources ponctuelles ne contribuent pas significativement à un nuage régional. En 1977, Ljungkvist signale que de tous les paramètres météorologiques, celui qui a le plus d'effet sur les concentrations d'herbacées à Stockholm (Suède) est le vent.

#### ✓ *Transport vertical*

Avec le temps, les quantités émises se dispersent, le volume d'air augmente et permet une diminution de la concentration du nuage ainsi qu'une homogénéisation des quantités en suspension. Ceci est lié à la diffusion qui s'opère dans les deux directions, verticale et horizontale. Afin d'étudier cet aspect de la diffusion dans la verticale, un certain nombre d'études ont privilégié l'installation de capteurs polliniques à différents niveaux permettant la comparaison des comptes obtenus simultanément à



ces différents emplacements. Outre l'étude du profil vertical des concentrations de pollen pour une question de diffusion verticale, ces études font souvent référence à l'impact des concentrations sur la santé (Raynor *et al.*, 1973) selon que l'on se trouve à proximité de la surface ou plus en hauteur par exemple travaillant ou vivant dans une immeuble de plusieurs étages. Ainsi Gagnon (1989) compare les concentrations enregistrées d'ambrosie à Montréal simultanément sur un toit à 20 m du sol et au sol. Les sources d'ambrosie sont relativement éloignées de ce site. Il s'avère que les concentrations sont toujours 1.5 fois supérieures sur le toit qu'au sol laissant entendre que la diffusion verticale pourrait se faire rapidement. Des résultats semblables sont obtenus par Kämpylä (1984) en Finlande ainsi que O'Rourke *et al.* (1984) en Arizona. Galán Soldevilla *et al.* (1995) trouvent un résultat semblable mais dans l'autre sens avec du pollen d'olivier échantillonné à Cordoba. Le site situé le plus proche de la surface montre les concentrations les plus élevées, laissant apparaître un lien très fort entre la proximité de la source et le capteur. Des conclusions semblables avaient été obtenues par Rantio-Lehtimäki *et al.*, (1991a) en Finlande et Bryant *et al.* (1989) en Grande-Bretagne. Par ailleurs, Galán Soldevilla *et al.* (1995) notent une corrélation négative entre l'augmentation de Tmax d'un jour à l'autre et les concentrations de pollen mesurées en altitude. Il semble en effet qu'une chute de la température entraîne sur le toit une augmentation des concentrations mesurées alors que ce n'est pas le cas à proximité de la surface. Nous savons que l'émission du pollen est le résultat de la conjonction de températures élevées et d'un faible degré d'humidité, ce qui explique que les concentrations polliniques proches de la surface n'augmentent pas. En revanche, les auteurs associent l'observation faite sur le toit, à un « effet de pluie pollinique ». Avec le refroidissement de la masse d'air, le pollen en suspension subit des forces de subsidence qui l'entraînent vers le bas, accroissant ainsi les concentrations mesurées sur le toit. En revanche, ces courants d'air vers le bas ne semblent pas détectés en surface, potentiellement effacés sous l'effet de la turbulence de surface. Alcázar *et al.* (2000) ont par ailleurs voulu étudier le comportement du nuage d'ambrosie à Montréal en fonction de la hauteur d'échantillonnage et selon différentes orientations. Il est en effet bien connu que lorsque les sources sont proches, les concentrations sont plus élevées au niveau du sol car directement affectées par la proximité de ces sources (Rantio-Lehtimäki *et al.*, 1991a ; Galán Soldevilla *et al.*, 1995). Par ailleurs, d'autres études montrent qu'en milieu plus fermé ces concentrations tendent à augmenter avec l'altitude sous l'effet d'écran généré par les bâtiments en milieu urbain (Bryant *et al.*, 1989 ; Malik *et al.*, 1991). A Montréal, les auteurs montrent que les concentrations sont toujours plus élevées au sol du côté Nord Est du bâtiment soit sous le vent dominant. Galán Soldevilla *et al.*, (1995) trouvent le même résultat et attribuent ceci à l'effet de turbulence généré à la base

du bâtiment par l'effet de sa présence. Sur cette façade là, l'effet des sources très locales est aussi probablement le plus marqué. Sur la façade NW, les concentrations décroissent avec l'altitude (résultat comparable à celui de Gagnon, 1989), en début de journée et le processus s'inverse en cours de matinée. Ce phénomène est peut être relié selon les auteurs au fait que les sources les plus abondantes sont relativement éloignées du site de mesure donc qu'il faut laisser le temps au pollen émis de s'élever dans l'atmosphère et être transporté jusque là par des courants plus élevés. La combinaison hauteur/orientation semble être plus déterminante du point de vue des différences de concentration plutôt que la variation au quotidien des concentrations comme l'avaient observés Raynor *et al.* (1973). Ces auteurs précisent que le pollen d'ambrosie semble être très mal mélangé dans l'air sur de courtes périodes de temps, mais que cette variabilité disparaît avec le temps laissant penser que peu importe où l'on se trouve, proche du sol ou en altitude, l'exposition au pollen est la même à part si l'on se trouve à très grande proximité d'une source. On peut rapprocher cette observation de l'hypothèse de Taylor qui énonce que dans certains cas, le vent peut être considéré comme mesure de la turbulence en fonction du temps notamment lorsque les tourbillons de turbulence se produisent à des échelles de temps plus longues que le temps qu'il faut à un tourbillon pour être enregistré (Stull, 1989). Cette hypothèse est tout à fait satisfaisante lorsque l'intensité de la turbulence est petite comparativement à la vitesse moyenne du vent. Fiorina *et al.* (1999) concluent de leur étude que les stations standard localisées sur un toit entre 15 et 20 mètres demeurent une bonne source de référence des quantités qui composent le nuage régional mais qu'il est toutefois intéressant de réaliser des échantillonnages au niveau de la rue afin de mieux déterminer les conditions polliniques auxquelles sont soumis les individus.

Ainsi, où que nous nous trouvions, le flux d'air est toujours variable. Les facteurs, vent et turbulence, modulent les conditions d'émission, de transport et d'élimination des particules. Il est donc nécessaire d'aborder la question de l'origine et de la mesure de la turbulence afin d'être en mesure d'estimer l'état de l'atmosphère dans le cas de nos propres simulations.

Depuis longtemps, vue la complexité des relations « pollen et climat », nombreux sont les chercheurs qui les étudient dans un but avoué d'arriver à prévoir à plus ou moins court terme, les concentrations polliniques à venir, ceci en vue d'une meilleure planification et gestion du risque d'allergie de la population de même que de l'effort thérapeutique associé.

Du fait de la grande difficulté associée aux différentes échelles et variations spatio-temporelles, aux différents types de pollen, types de surfaces à considérer, cette question de la prévision des concentrations du pollen ou

de toutes autres particules biologiques à l'aide d'outils plus ou moins perfectionnés, demeure d'une actualité brûlante. Des études nombreuses et disponibles dans la littérature proposent différentes techniques de prévision pollinique qui vont de la plus « sommaire » à la plus perfectionnée. La méthode que nous avons appliquée au cas de Montréal appartient à la nouvelle génération de techniques, appelée la modélisation numérique. Elle ne permet pas encore de faire de la prévision en tant que tel mais sa force est en revanche de nous permettre d'entrer dans le détail du transport pollinique, au sein même du nuage, selon 4 dimensions (3 spatiales, 1 temporelle), chose absolument inimaginable avec autant de précision sur le terrain. Avant d'aborder le cas de la modélisation numérique à haute résolution, nous proposons une revue de la littérature permettant de faire un état de la question et des méthodes disponibles.

### 3. Modélisation et prévision pollinique

Le pollen dans l'air doit être considéré comme un polluant atmosphérique. Dès lors, s'intéresser à la modélisation des concentrations polliniques, s'apparente à étudier la pollution atmosphérique. Une pléthore de travaux existe dans ce domaine, que nous ne pouvons citer. Notre échelle de travail est, selon Orlanski (1975), la méso échelle qu'il définit comme étant influencée par des conditions hydrodynamiques spécifiques telles que les effets d'accélération du vent ou de la rugosité de même que les inhomogénéités du bilan d'énergie dues à la grande variabilité spatiale (occupation du sol, végétation, eau, pente et orientation du relief). Les grandeurs caractéristiques de cette échelle varient entre 1 et 1000 km. D'ailleurs, le développement de modèles de dispersion de particules est depuis quelques années assez en vogue (Moussiopoulos et *al.*, 1996). A cette échelle, les effets thermiques sont déterminants des conditions de dispersion notamment lorsque le flux d'air est calme et ne favorise pas de lui-même une bonne ventilation. Comme pré requis minimum pour un modèle de ce type, il est nécessaire d'être en mesure de reproduire avec fiabilité les systèmes locaux de la circulation. Ces processus de méso échelle affectent en effet les phénomènes de dispersion de l'échelle locale vers l'échelle régionale. Les milieux urbains sont typiques de cette échelle. Cependant la description de tels phénomènes nécessite l'utilisation d'outils de modélisation plutôt complexes.

Un très grand nombre de modèles existent déjà que l'on peut classer selon différents aspects qui les caractérisent, tels que l'échelle spatiale, l'échelle temporelle (modèles épisodiques ou statistique à long terme), le traitement des équations du transport (modèles eulériens, lagrangien), le traitement de certains processus (chimiques, déposition sèche ou humide) ou encore selon la complexité de

l'approche employée. Dans le cas présent, nous utilisons la distinction faite par Raynor et *al.* (1970) qui différencie les uns comme étant: « orientés vers la source » et les autres « orientés vers le récepteur ». Les premiers impliquent une bonne connaissance des sources locales ou régionales d'où peuvent arriver les pollens enregistrés dans la région où sont faites les mesures. Il faut ensuite appliquer à ces valeurs des formulations mathématiques permettant d'étudier leur diffusion. Ce type de modèle nécessite également une bonne connaissance des autres paramètres météorologiques, des paramètres associés aux sources ainsi que du temps de calculs informatiques non négligeable. Ils sont les plus « simples » de la famille dite des modèles déterministes.

Dans un premier temps, nous nous intéressons aux modèles « orientés vers le récepteur » tels que définis par Raynor et *al.* (1970). Dans ce cas, on part du principe que les concentrations pour le lieu donné de l'étude sont prédictibles sans connaissance particulière de la source et de ses caractéristiques mais en établissant des relations entre le comportement pollinique et les conditions atmosphériques mesurées ou estimées. Ces modèles sont dits empiriques.

#### 3.1. Modélisation empirique

Cette première famille de modèles englobe l'ensemble des approches basées sur l'analyse statistique, des modèles les plus simples aux plus compliqués. C'est-à-dire qu'à partir de données d'observation, la première étape est d'essayer d'établir des liens entre les concentrations et les différents paramètres météorologiques. Nous avons déjà cité nombre de ces études dans les sections précédentes. Ils ont pour objectif de fournir une estimation acceptable des quantités de pollen prévues. Ils sont bâtis à partir de séries temporelles longues, tant de conditions polliniques que météorologiques, que l'on met en rapport les unes avec les autres. Les estimations sont en principe assez satisfaisantes si les séries temporelles employées sont consistantes, fiables, homogènes et représentatives des conditions de l'environnement du moment pour lequel on fait la prévision.

##### i. Analyse descriptive

Ces modèles stochastiques se basent sur des techniques statistiques et semi empiriques en vue d'analyser des tendances, périodicité et interrelations entre qualité de l'air et mesures atmosphériques de même que l'évolution de leur prévision. De nombreuses techniques existent comme les analyses de distribution de fréquences, les analyses de séries temporelles, le modèle Box-Jenkins, les analyses spectrales, etc.

Les techniques les plus simples, basées sur l'observation de longues séries temporelles permettent de développer

des calendriers phénologiques et polliniques qui informent avec une bonne qualité de prévision, du début d'une saison pollinique et de son allure globale (intensité et durée) (Ong *et al.*, 1995 ; citer autres exemples de calendriers polliniques). Cependant, bien que ces observations faites sur le long terme, incluent de façon inhérente les conditions climatiques, elles ne tiennent pas compte de leurs effets au jour le jour. Aussi, l'intégration de l'élément météorologique comme modulateur des conditions phénologiques et polliniques est nécessaire afin de parvenir à un plus grand niveau de précision (Tirabassi *et al.*, 1991).

En 1956, Marx qui réalisait une thèse sur la prévision de l'ambrosie en Pennsylvanie, concluait que l'on pouvait sans trop de peine prévoir qualitativement des tendances et allures de comptes polliniques quotidiens ou saisonniers mais que quantitativement cela demeurait encore non fiable. En 1957, Dingle mettait également le doigt sur le potentiel offert par la mise en relation des concentrations et conditions météorologiques. L'influence des conditions météorologiques ne fait en effet plus aucun doute sur les comportements polliniques et de très nombreux modèles incorporant ces paramètres sont existants. Bonvalot (1997) en fait un recensement. Les fluctuations quotidiennes des conditions météorologiques notamment des températures, des précipitations, de l'ensoleillement et de l'humidité sous leurs différentes formes, entraînent des variations quotidiennes marquées des concentrations polliniques et sont les paramètres les plus souvent introduits dans ces modèles. Les paramètres sont mis en relation par le biais de régressions linéaires (Mandrioli *et al.*, 1978 ; Recio *et al.*, 1997 ; Galàn *et al.*, 2000 ; Laaidi, 2001 ; Ribeiro *et al.*, 2003) ou polynomiales (Ljungkvist *et al.*, 1977 ; Galàn *et al.*, 1998 ; Norris-Hill *et al.*, 1995). Dans certains cas, il s'agit aussi d'analyses de séries chronologiques (Moseholm *et al.*, 1987) qui visent à faire ressortir des phénomènes cycliques, saisonniers ou autres. Dans ces modèles, des fonctions permettent de décrire l'émission et la dispersion du pollen en la combinant à d'autres paramètres relatifs à la plante et aux conditions atmosphériques. Toutefois ces approches demeurent souvent difficilement applicables ailleurs que là où elles ont été appliquées ou encore, parce que basées sur l'observation, elles ne tiennent pas compte de l'ensemble des facteurs qui interviennent. Parmi elles, on compte des analyses descriptives de relations de comportement pollinique et de paramètres météorologiques (Davies, *et al.*, 1973 ; Mäkinen, 1985 ; Agashe *et al.*, 1989 ; Galán *et al.*, 1991, 1995 ; Hart *et al.*, 1994 ; Koivikko *et al.*, 1996 ; Frenguelli *et al.*, 1998 ; Norris-Hill, 1998 ; etc), des outils de prévision en tant que tel (Raynor *et al.*, 1970 ; Davies *et al.*, 1973 ; Spieksma ; 1980 ; Bringfelt *et al.*, 1982 ; Törnevick, 1983 ; Moselholm *et al.*, 1987 ; Frenguelli *et al.*, 1989 ; Andersen, 1991 ; Macchia *et al.*, 1987 ; Keynan *et al.*, 1989 ; Comtois *et al.*, 1987, 1992, 1991 ; Subiza *et al.*, 1992 ; Puppi Branzi *et al.*, 1992 ;

Mandrioli *et al.*, 1993 ; Antepará *et al.*, 1995 ; Stark *et al.*, 1997 ; Adams-Groom *et al.*, 2002 ; García-Mozo, H., 2002 ; Cotos-Yáñez *et al.*, 2004).

Ainsi les premiers cités se concentrent plutôt sur la prévision de la sévérité d'une saison pollinique, d'autres sur le début, le pic et/ou la fin de la saison, alors que le second groupe tend vers la prévision des concentrations comme c'est le cas de celui de Comtois *et al.* (1987) développé afin de permettre de prévoir pour la région de Montréal les risques d'allergie avec deux jours d'avance. Selon Bonvalot (1997), force est de constater qu'avec ce genre de modèles, la détermination de la date du début de la saison pollinique est un paramètre nécessaire au fonctionnement de tout modèle qui veut estimer les concentrations polliniques. Cette date de début de saison n'est pas un critère défini mais peut, pour certains, correspondre à un seuil de cumul de pollen tel que pour Andersen (1991) entre 2.5 et 5% de la part de pollen total ou pour d'autres, être relative à la symptomatologie des patients allergiques. Dans certains cas, sachant que d'un point de vue clinique, certains signes annoncent généralement le démarrage d'une saison pollinique, des tentatives ont eu lieu pour trouver des liens entre le début avéré de la pathologie allergique et les conditions polliniques (Spieksma *et al.*, 1995 ; Leuschner *et al.*, 2000 ; Chappard *et al.*, 2004). Dans le cas des modèles qui prévoient plutôt la sévérité d'une saison, il a été noté que dans la plupart des cas, la quantité totale de précipitations pré saisonnière était déterminante (Bonvalot, 1997). Valencia-Barrera *et al.* (2002), quant à eux, ont montré que l'usage d'indices bioclimatiques pouvait être une autre avenue pour la prévision. Ils ont considérés que ces indices avaient en effet plus de chance d'intégrer un plus grand nombre de conditions révélatrices de l'état de l'atmosphère à un moment donné que chaque paramètre météorologique pris individuellement. Il semble donc que la connaissance et l'intégration dans ces outils, des conditions initiales, améliore le résultat final donc permette d'offrir une meilleure prévision.

Une année hors du commun risque de ne pas être prévue avec réalisme. En effet, du fait que ces modèles empiriques traditionnels ne prennent pas en compte les mouvements des particules et qu'ils sont par ailleurs également limités dans le temps et au lieu pour lequel les données polliniques et météorologiques sont extraites, ils demeurent incapables de fournir une information complètement réaliste de la situation. Ils demeurent ainsi intrinsèquement limités puisqu'ils ne permettent pas d'établir de lien de cause à effet. La principale lacune est que ces approches se basent uniquement sur des observations du passé pour extrapoler vers l'avenir sans prendre en considération l'ensemble des processus qui interviennent. Ils demeurent toutefois des outils très intéressants dans des cas de simulations à court-terme et en temps réel, lorsque l'information disponible à partir

de tendances mesurées de concentrations et plus efficace pour des prévisions immédiates par exemple que celles obtenues par le biais de méthodes déterministes. La méthode Box-Jenkins (Box et *al.*, 1976) qui a dominé pendant les années 1970 une grande part de la prévision à partir de séries temporelles a aussi été employée pour la prévision pollinique (Belmonte, 2002). L'idée est d'employer un modèle (ARIMA) qui intègre à la fois le processus régressif (AR) et celui des moyennes mobiles (MA). En effet, une série chronologique est le résultat de plusieurs effets qui ont souvent un caractère aléatoire. En combinant différents processus aléatoires, on peut obtenir une série qui représente dans une certaine mesure, l'évolution du phénomène. Ainsi du fait que le passé influence toujours les valeurs actuelles, la série suit un processus autorégressif et l'ordre de celui-ci dépend du nombre de valeurs qui influencent les valeurs actuelles. Cette méthode ne tient compte que de combinaisons linéaires, ce qui est une limitation majeure (Zhang, 2003). En dépit de la complexité du modèle, elle demeure incapable de détecter d'autres patrons non linéaires qui affectent pourtant le phénomène environnemental tel que les concentrations polliniques. La réalité est trop simplifiée. Voilà pourquoi depuis quelques années, une nouvelle vague d'approche a vu le jour avec l'emploi des modèles neuronaux ou « Artificial Neural Networks » (ANNs) qui sont des outils adaptés à l'analyse de séries temporelles mais qui permettent de modéliser les phénomènes complexes et non linéaires.

## ii. Réseaux neuronaux

Ces réseaux sont des modèles mathématiques sensés simuler, à petite échelle, le mode de transmission de l'information dans le cerveau humain à partir d'événements perçus. Ils doivent être en mesure d'analyser, de reproduire les mécanismes d'apprentissage et de reconnaître des événements selon le même mode que notre cerveau. Les cellules reçoivent une information en entrée en bonne quantité, la transforment à l'aide d'une fonction de type non linéaire sinusoïdale et produisent un résultat. Les connections entre les cellules sont multiples et ont une valeur appelée le poids synaptique. Leur ensemble constitue le réseau. De manière à alimenter le modèle, la première couche compte autant de cellules que de variables indépendantes à considérer. Elles reçoivent une valeur d'entrée qu'elles transmettent aux cellules de la couche suivante, pondérée par le poids synaptique de chacune des connections et ainsi de suite. Enfin, la couche de sortie se compose d'autant de cellules que de variables dépendantes. Dans le cas des études qui nous intéressent, il s'agit la plupart du temps des concentrations de pollen (Sánchez-Mesa et *al.*, 2002, 2005; Ranzi et *al.*, 2003; Catellano-Méndez et *al.*, 2005). La quantité d'information en entrée est critique. En effet, trop peu, peut être vraiment limitante alors que trop, risque de compliquer le réseau sans raison. Des méthodes telles

des modèles de régression linéaire (Sánchez-Mesa et *al.*, 2002), la méthode d'Analyse en Composantes Principales ou l'Analyse de Discriminants (Sánchez-Mesa et *al.*, 2005) sont de bons moyens de classement qui permettent de réduire cette information initiale sous la forme d'une version condensée des facteurs qui contribuent aux différences entre les groupes. La caractéristique principale des réseaux neuronaux est d'apprendre par l'exemple. Ils apprennent des informations qu'on leur fournit grâce à l'algorithme d'apprentissage. A partir de là, ils sont capables de faire de la prévision en se basant sur leur « expérience ». Après la quantité d'information en entrée, l'autre problème crucial est de sélectionner l'architecture du réseau la plus appropriée possible. Elle implique de trouver un nombre de nœuds et un nombre de connections entre ces nœuds les plus à propos pour les différents niveaux du réseau. En effet, taille et structure du réseau affecte sa complexité de même que le temps à investir pour « l'entraîner » et encore plus, sa capacité à généraliser et produire une information fiable et satisfaisante à partir de données autres que celles de la période d'initialisation. Des algorithmes dits évolutifs permettent de déterminer ce type d'information (Sánchez-Mesa et *al.*, 2005).

Dans le cas de l'étude de Ranzi et *al.* (2003) portant sur le développement d'un outil de prévision pollinique, le réseau employé est dit « alimenté par l'avant » ou « feed-forward neural network model ». Il compte 25 cellules en entrée, 8 dans la couche intermédiaire et une en sortie correspondant à la concentration pollinique prévue. L'objectif de cette recherche est de voir si ce modèle est en mesure de simuler des dépassements de seuils. Dans leur démarche, les auteurs emploient deux modèles. Le premier basé sur des régressions entre paramètres météorologiques, combinaisons de ceux-ci et seuils associés, qui permettent de déterminer quel jour un certain seuil pollinique donné est atteint. Le second, le réseau neuronal, permet ensuite à partir de ces informations de produire une valeur de concentration pollinique quotidienne. La force du réseau est de présenter un composant auto régressif de même qu'une non linéarité intrinsèque. Mais dans les deux cas, les résultats obtenus sont intéressants. Tous deux sont en mesure de détecter des années anormales ainsi que de montrer que les relations entre conditions météorologiques et polliniques sont indépendantes du site. Le réseau neuronal montre donc une plus grande robustesse pour la prévision d'années inconnues.

Ces réseaux sont caractérisés comme étant des techniques de régression non linéaire semi paramétriques. Leur force réside dans les situations présentant des phénomènes hautement non linéaires et lorsque la dynamique du problème étudié n'est pas claire. Cependant, leur caractère « boîte noire » peut aussi leur conférer des faiblesses quand vient le temps de l'interprétation des résultats.



Ainsi des situations vraiment très différentes de celles contenues dans l'information mise à leur disposition ne sont pas particulièrement appropriées pour ce type de technique. Quoiqu'il en soit, dans l'étude préalablement citée de Ranzi *et al.* (2003), les résultats sont plutôt satisfaisants pour la prévision des graminées et notamment de la date du début de la saison. Les quantités sont en revanche sous estimées et nécessiteraient l'introduction de certaines autres variables prédictives telles que le vent et l'humidité. Des études de Sánchez-Mesa *et al.* (2002, 2005), il ressort que le modèle neuronal offre une meilleure méthode de prévision que la régression linéaire dans la plupart des cas et ceci en dépit du fait que les modèles issus de ces réseaux sont beaucoup plus complexes et intègrent également un plus grand nombre de paramètres. Le résultat de leurs études est qu'il est possible de déterminer la sévérité d'une saison pollinique avant que celle-ci ne commence, avec un minimum d'erreur possible en se basant uniquement sur des paramètres météorologiques pré saisonniers. Castellano-Méndes *et al.* (2005) se sont, quant à eux, intéressés à la prévision de la probabilité de mesurer des comptes polliniques de bouleau situés au-delà de certains seuils. Les résultats sont très satisfaisants. Allant dans le même sens, Arca *et al.* (2004) obtiennent de bons résultats également pour la prévision des graminées et notent tout comme Ranzi *et al.* (2003) et Cotos-Yáñez *et al.* (2004) qui, eux ont travaillé sur la prévision des concentrations de bouleau à partir de modèles de régression linéaires et semi linéaires, que la conjonction de paramètres météorologiques avec les concentrations polliniques du jour précédent, augmente la capacité du modèle à donner de bons résultats. Ces réseaux neuronaux peuvent être considérés comme de bons outils de prévision et constituent un pas en avant vers l'amélioration de celles-ci. Cependant pour autant compliqués qu'ils sont, ces réseaux ne font « qu'établir » des relations entre le comportement pollinique et les conditions atmosphériques d'une région donnée. Certes ces relations sont très fortes et statistiquement significatives mais elles demeurent empiriques et ne tiennent en aucun cas du déplacement du pollen ainsi que de facteurs tels que le vent et le temps.

De ce fait, d'autres approches existent depuis déjà longtemps qui visent à prévoir le comportement du pollen mais en considérant cette fois sa trajectoire aérobiologique de manière plus explicite. Ces méthodes font appel à des caractéristiques physiques du pollen et du milieu dans lequel il évolue. Bien que différentes, ces approches ne sont pas pour autant opposées aux précédentes mais plutôt complémentaires. Elles possèdent cependant et indéniablement un potentiel à reproduire les phénomènes avec un réalisme beaucoup plus marqué.

### 3.2. Modélisation déterministe

La modélisation déterministe ou théorique, vise à prévoir les quantités de pollen à partir de la modélisation de processus physiques déterminant l'émission, le transport et la déposition du pollen. Ces modèles mathématiques ont pour but d'expliquer les relations complexes entre sources d'émission et récepteurs. Il s'agit pour cela d'intégrer des processus liés au transport atmosphérique ainsi que d'autres associés à la déposition du pollen, le tout dans un modèle de l'atmosphère. Ils sont employés dans de très nombreux cas de pollution environnementale au sens large, allant de l'évaluation de l'impact de nouvelles sources, à la planification ou l'amélioration de réseaux de surveillance ou encore la prévention de risque de pollution, d'allergie... Afin d'être acceptables, ces modèles doivent tenir compte de nombreux facteurs tels que les sources d'émission (nature, volume et localisation) et les conditions de l'atmosphère (stabilité atmosphérique, vitesse et direction du vent, mécanismes de déposition). Tous ne sont en revanche pas en mesure de prendre en considération l'ensemble de ces caractéristiques en même temps. Il arrive fréquemment que les modèles de dispersion sur courte distance ne tiennent pas compte des phénomènes de déposition alors que ceux de transport sur de longues distances, négligent la diffusion verticale. Ainsi allons nous distinguer plusieurs familles de modèles parmi ces approches mathématiques, allant des plus simples, c'est-à-dire faisant appel à un nombre moins important de facteurs, aux plus compliqués, intégrant l'ensemble des phénomènes tant atmosphériques que polliniques dans leur « presque » globalité. La dernière famille que nous aborderons et celle qui correspond aux modèles les plus complets. Il en existe un certain nombre qui sont en réalité un couplage de plusieurs modèles ou modules dont certains sont extraits des précédentes familles. A ce propos l'article de Fraile *et al.* (2006) propose un inventaire exhaustif des principaux modèles météorologiques employés en vue de prévoir et diagnostiquer le transport sur de longues distances de gaz et d'aérosols.

#### i. Modèles gaussiens de dispersion

La première famille se compose d'un ensemble de modèles tels ceux présentés par Okubo *et al.* (1989) qui s'intéressent, pour la plupart, à étudier la dispersion du pollen par le vent. La distance jusqu'à laquelle le grain de pollen va voyager est déterminée en fonction de facteurs tels la hauteur à laquelle a eu lieu l'émission, la vitesse du vent, la turbulence ainsi que certaines caractéristiques morphologiques des grains eux-mêmes comme la vitesse de sédimentation. De manière typique, la courbe de dispersion d'une particule émise dans l'air diminue avec la distance à la source, atteignant un maximum à une certaine distance. Dans le cas d'une source distribuée dans l'espace, le pic se produit généralement en frontière de

la région source. Certains modèles considèrent plutôt les forces de diffusion, d'autres celles d'advection, mises en relation avec les propriétés des particules et de la hauteur d'émission. Pour décrire ces courbes de dispersion, des méthodes sont employées depuis longtemps, qui sont la courbe de puissance inverse (Gregory, 1968) ou l'exponentielle négative (Frampton *et al.*, 1942). Le premier modèle a la particularité de transformer en une ligne droite la courbe de dispersion sur un graphique log-log. La seconde méthode présente la particularité sur la première de permettre à la densité de probabilité associée à la dispersion de demeurer finie quand la distance à la source tend vers 0. Dans les deux cas, ces modèles sont des modèles simples, qui ne nécessitent que deux paramètres. Ils permettent d'arriver à de très bons résultats pour des cas spécifiques mais ne sont en revanche pas du tout généralisables ou à une région ou à d'autres sources ponctuelles sans avoir au préalable fait de nouvelles mesures.

Lorsque l'on étudie la pollution de l'air, on sait que de nombreux polluants sont émis à partir de cheminées et présentent une température supérieure à celle de l'air favorisant ainsi un flux de momentum vertical. Les modèles de panache de fumée (plume-rise model) offrent la possibilité d'étudier le déplacement vertical et le comportement général du panache au cours de sa phase initiale de dispersion. Du fait de ces caractéristiques thermiques, ces types de modèles ne sont pas particulièrement bien adaptés au pollen. En revanche, si l'on complexifie l'information entrant dans le modèle de diffusion, on arrive au modèle gaussien de dispersion atmosphérique valable dans la couche limite atmosphérique et se basant sur la formule de Pasquill-Gifford (Pasquill, 1962). Les premiers modèles de dispersion utilisés sur ordinateur sont de ce type. Ils sont dits de dispersion passive et supposent que la répartition du polluant suit une loi gaussienne dont les écarts-types dépendent de la distance à la source ou du temps écoulé depuis l'émission (appelé aussi temps de transfert), ainsi que des caractéristiques de la structure de l'atmosphère. Les modèles de ce genre s'appliquent à un polluant qui n'est soumis qu'à l'action du fluide porteur (air), c'est-à-dire qui, par sa densité, sa température ou sa concentration ne provoque pas de modification significative des caractéristiques de l'air, en particulier ne perturbe pas son écoulement. Ceci suppose qu'au niveau du rejet, la vitesse du vent reste la même avec ou sans polluant. Ces modèles sont assez bien adaptés aux conditions météorologiques moyennes, au champ lointain (plus de 100 m de la source), aux nuages ne s'éloignant pas trop du sol (cisaillements verticaux), s'il n'y a pas d'obstacles et même en général de relief, aux vents de direction constante et de vitesse non nulle. Il calcule la distribution horizontale et verticale des particules sous l'effet de l'advection et de la diffusion. Pour simplifier le problème des bordures, on assume une réflexion de ses

conditions aux frontières à la surface de la terre, ignorant ainsi la déposition. Souvent employé pour l'étude des panaches de fumée, il l'a également été dans le cadre d'études sur la dispersion de spores ou de pollens. Le modèle gaussien permet de définir une quantité sans dimension, analogue au nombre de Reynolds<sup>4</sup>, qui permet de mesurer la dispersion relative des particules autour de la moyenne. Une de ses limitations est cependant qu'il ne tient pas compte des phénomènes de déposition. C'est pourquoi Okubo *et al.* (1989) développent des modèles d'advection, diffusion et déposition. Ils prennent en considération que le vent n'est pas constant mais dépend de l'altitude, que la diffusion turbulente ne peut être traitée comme une constante mais qu'elle doit aussi dépendre de la hauteur et qu'enfin les processus de déposition génèrent des conditions aux frontières plus compliquées. En dépit de cela, le modèle gaussien demeure selon les auteurs un bon moyen d'approximation. Dans le même ordre d'idée, les danois disposent du modèle OML<sup>5</sup> (Operationelle Meteorologiske Luftkvalitetsmodeller) développé par l'Institut National Danois de Recherche Environnementale. Il s'agit d'un modèle Gaussien qui décrit la dispersion passive ou par le vent, d'un gaz à partir d'une source unique ou multiple sur une distance maximale de 20 km. Horst (1977) y a inclus une paramétrisation permettant de simuler la vitesse de sédimentation du pollen. Ce modèle n'emploie pas les classes discrètes de stabilité mais décrit les processus de dispersion en terme de paramètres d'échelle de base de la couche limite atmosphérique, tels que la friction, la longueur de Monin-Obukov et la convection. Par ailleurs avant d'employer le modèle, un prétraitement préliminaire doit être effectué concernant les caractéristiques météorologiques. Løfstrøm et ses collaborateurs (2003) l'ont employé pour simuler la dispersion sur de longues distances de pollen génétiquement modifié à partir d'une culture de colza et analyser la variabilité temporelle et spatiale des concentrations horaires de pollen de même que leur déposition.

## ii. Modèles eulériens et lagrangiens

Enfin, un autre essor de la modélisation est directement lié à la culture accrue de céréales génétiquement modifiées (OGM) qui nécessite un contrôle soutenu du risque potentiel de pollinisation croisée tel que dans les champs de maïs par exemple. Afin de répondre à ce besoin croissant de surveillance, Arritt *et al.* (2003, 2004) ont développé le modèle APRA (Adventitious pollen risk assessment) qui couple à la fois les processus physiques et biologiques qui entrent dans la pollinisation du maïs. Le cœur de ce modèle est un modèle lagrangien de dispersion ; méthode qui permet à la fois de suivre le déplacement des pollens en mouvement mais aussi d'évaluer l'impact des conditions physiques (vent et turbulence) sur ceux-ci de même que sur leur viabilité. Les modèles Lagrangien sont des alternatives aux modèles eulériens qui eux,

<sup>4</sup> Nombre de Reynolds : il caractérise la nature du régime (laminaire, transitoire, turbulent etc. ...) d'un écoulement. Il représente le rapport entre forces d'inertie et forces visqueuses. Il s'agit d'un nombre sans dimension mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds.

<sup>5</sup> Site internet du modèle OML consulté le 27.09.05 : [http://www2.dmu.dk/1\\_Viden/2\\_Miljoetilstand/3\\_luft/4\\_spredningsmodeller/5\\_OML/default\\_en.asp](http://www2.dmu.dk/1_Viden/2_Miljoetilstand/3_luft/4_spredningsmodeller/5_OML/default_en.asp)



résolvent numériquement les équations de la diffusion atmosphérique comme celle de la conservation de la masse du polluant. La plupart du temps ils sont intégrés au sein des modèles météorologiques pronostiques. Le modèle APRA inclut des facteurs biophysiques qui affectent la viabilité du pollen. Cette question est intégrée sous la forme d'une fonction d'âge qui tient compte de la température, de l'humidité et du temps.

### iii. Modèles de trajectoire

D'autres types de modèles mathématiques, s'intéressent à calculer des trajectoires inverses (Back trajectory model) dans le but d'identifier la provenance de masses d'air affectant la qualité de l'air d'un endroit donné. Un certain nombre d'exemples existent dans la littérature plus ou moins récente, d'études ayant employé ces techniques pour définir la provenance de nuages de pollen. Ils sont intéressants en vue de la détermination de la provenance de ces pollens, spores ou autres polluants chimiquement stables. Ces modèles sont généralement relativement aisés d'utilisation et suffisamment robustes pour déterminer la source d'un polluant. L'idée est de « marquer » une parcelle d'air à un moment donné en un lieu donné et de la suivre. Farham *et al.* (2003) proposent l'emploi de ces techniques de trajectoires dans le cadre de l'étude de la pollution de l'air en Nouvelle Zélande de même que Moy *et al.* (1994) en milieu rural en Virginie où ils suivent les concentrations de CO, O<sub>3</sub> et NO<sub>x</sub>. On peut aussi les employer comme Dexheimer *et al.* (2004) en vue de faire une analyse climatologique quantitative de la circulation d'échelle régionale dans une région donnée, ici au Texas. Dans le cas de l'accident de Tchernobyl, Persson *et al.* (1987) avaient employé ce type d'outil pour estimer la quantité de radiation émise par la centrale nucléaire. Powell (1993) fait état de l'emploi de modèles de trajectoires.

Cette méthode a enfin été employée à plusieurs reprises pour localiser des sources de pollen. Ainsi Clot (2005) l'a appliquée pour le pollen d'ambrosie dans l'Ouest de la Suisse, Cecchi *et al.* (2005) l'on également employé avec succès pour désigner la source de l'ambrosie également mais à Florence cette fois. Smith *et al.* (2005) ont aussi utilisé cette méthode à Worcester pour la détection des sources de pollen de graminées à l'occasion d'épisodes polliniques particulièrement importants. Cette technique est également employée par une équipe de chercheurs de l'Université de Tulsa<sup>6</sup> dans l'Oklahoma sous la direction du Professeur E. Leventin afin de suivre et prévoir l'évolution de la pollinisation du cèdre des montagnes (*Juniperus ashei*) dont les pollens peuvent voyager sur de très longues distances en peu de temps en suivant les courants de vent dominants. Les cèdres du Sud de l'Oklahoma et du Texas émettent leurs pollens pendant l'hiver et leur pollen peuvent être comptabilisés bien au-delà de Dallas, Tulsa, voir même plus au Nord.

L'Université de Tulsa propose sur son site internet depuis plusieurs années des prévisions de risque d'allergie au pollen de cèdres avec deux jours d'avance. Une autre étude attire notre attention. Tirée du projet EPILOBE qui vise à enregistrer tout au long de l'année et en plusieurs points de mesure le pollen côtier du Groenland afin d'en connaître la variété et d'en déterminer la provenance, Rousseau *et al.* (2005 ; 2004 ; 2003) rapportent des résultats obtenus à partir de l'usage d'un modèle de trajectoire. Ils proposent par ailleurs une bonne revue de la littérature traitant de l'emploi de ce type d'approche pour la détermination de sources de pollens mais en indiquant cependant qu'aucune d'entre elles n'a jamais porté sur la trajectoire complète de la source au lieu de la déposition. Ils concluent à un apport probablement constant en pollen provenant du Nord Est de l'Amérique sur la côte groenlandaise.

Le modèle de trajectoire employé à Tulsa est le même que dans le cadre de l'étude de Cecchi *et al.* (2005) ou celle de Rousseau *et al.* (2005 ; 2004 ; 2003). Il s'agit du « NOAA HYSPLIT model »<sup>7</sup> (Draxler *et al.*, 1998). Son nom signifie « HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory ». La dernière version mise à jour en juillet 2005 correspond à un système complet permettant de calculer à la fois les trajectoires d'une parcelle d'air mais aussi de simuler le complexe dispersion - sédimentation. De nouvelles caractéristiques qui n'étaient pas nécessairement toutes disponibles préalablement ont en effet été incluses telles des algorithmes d'advection, une stabilité atmosphérique améliorée, des équations de dispersion, de même qu'un nouvel interface graphique et finalement une option permettant l'adjonction au besoin d'un module de transformation chimique. Ainsi, dans le cadre de l'étude de Rousseau *et al.* (2005) le modèle n'intègre pas de module de sédimentation, ce qui à certains égards limite les interprétations que l'on peut faire des résultats.

Dans son état le plus simple, le modèle peut être exécuté pour obtenir une rapide estimation de la trajectoire prévue d'une parcelle d'air dont le point d'origine ou le point d'arrivée (rétro trajectoire) est spécifié comme paramètre d'entrée. Dans ce cas là, on ne tient aucun compte d'autres processus que celui de l'advection par les courants atmosphériques. Il fonctionne alors comme un simple calculateur de trajectoire. Il s'agit par exemple du type de modèle employé par la Division de la réponse aux urgences environnementales d'Environnement Canada<sup>8</sup>. C'est à l'occasion de l'usage de ce type de modèle dans une version simplifiée que Smith *et al.* (2005) concluent dans le cas des forts épisodes de pollinisation aux graminées à Worcester que la méthode permet jusqu'à un certain point de considérer l'origine ou la destination des pollens mais ne permet pas pour autant de faire de la prévision à court terme. Dans ce cas, bien qu'intéressante mais ne considérant pas

<sup>6</sup> Site internet de l'Université de Tulsa, Oklahoma consulté le 24.09.05 : <http://pollen.utulsa.edu/mcforecast.html>

<sup>7</sup> Site internet du NOAA HYSPLIT Model consulté le 24/09/05 : <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html>

<sup>8</sup> Site internet de la Division de la réponse aux urgences environnementales d'Environnement Canada, consulté le 24.09.05 : [http://www.msc-smc.ec.gc.ca/cmceer/model/trajectory/index\\_f.html](http://www.msc-smc.ec.gc.ca/cmceer/model/trajectory/index_f.html)

<sup>9</sup> Site internet faisant référence au modèle SMOP-2D consulté le 27.09.05 : [http://pastel.paristech.org/archive/00000781/01/These\\_NJ.pdf](http://pastel.paristech.org/archive/00000781/01/These_NJ.pdf)

les processus convectifs de sous échelle, la méthode demeure incomplète et le risque d'erreur notamment sur de longues intégrations n'est pas négligeable (Moy et *al.*, 1994 ; Robertson et *al.*, 2004) Toutefois, couplés à l'étude de conditions météorologiques ils peuvent permettre de mieux comprendre les conjonctions de phénomènes et situations météorologiques à la source de pics majeurs pour un lieu donné. Allant dans le même sens en 2004, dans la même mouvance concernant l'emploi des OGM, Jarosz et ses collaborateurs publient le résultats obtenus à l'aide d'un modèle stochastique lagrangien appelé SMOP-2D<sup>9</sup> (Stochastic Mechanistic Model for Pollen dispersion and deposition in 2 Dimensions) qui permet de simuler la dispersion par le vent du pollen en calculant les trajectoire suivies par ce pollen depuis sa source d'émission jusqu'à sa déposition. L'expérience est faite sur du pollen de maïs. Les résultats sont satisfaisants du point de vue des profils de dispersion obtenus sous le vent d'une parcelle de maïs mais les taux de déposition sont en revanche quelque peu sous estimés dans les premiers 10 mètres de la source. Les auteurs en concluent que la paramétrisation de la turbulence est probablement en cause et démontrent que ce type de modèle nécessite d'être couplé à des modèles de flux d'air tenant compte de la complexité de la surface de manière à les rendre plus efficaces.

Afin de parvenir à une prévision mieux ciblée dans le temps et dans l'espace de la distribution des pollens allergisants de manière à ce que la population sensible puisse accorder ses activités extérieures tout en minimisant les risques d'allergie, il est nécessaire de développer des outils encore plus perfectionnés que tous ceux préalablement décrits. Nous arrivons ainsi à la dernière famille de modèles déterministes.

#### iv. Modèles météorologiques et climatiques

Il s'agit des modèles les plus complets mais aussi les plus complexes. En effet, du fait de l'impossibilité de réaliser des expériences «in situ» sur le climat, l'approche a consisté à mettre au point des modèles mathématiques capables de reproduire les principales caractéristiques physiques et thermodynamiques du système climatique. La complexité de cette modélisation numérique du climat dépend à la fois des exigences à satisfaire telle la résolution spatiale et des ressources informatiques disponibles permettant de résoudre numériquement le système d'équations. Parmi la grande variété de ces modèles de climat développés et disponibles à travers le monde, le modèle régional canadien du climat (MRCC) se base sur les techniques numériques les plus modernes et les plus performantes de la simulation numérique. Elles permettent d'effectuer des simulations climatiques à des résolutions de fines échelles (i.e. des simulations où la distance entre chaque point de grille horizontale est de 1km) avec un pas de temps de 15 minutes entre chaque

intégration. Un module de pollen y a été introduit, qui le rend désormais apte à simuler le déplacement d'un nuage d'ambrosie, ceci dans les 3 dimensions spatiales et en fonction du temps. Mais avant de développer la question du MRCC, comparons le à ce qui est disponible dans la littérature.

Partant du principe que les prévisions disponibles à partir du modèle du Centre National Météorologique (NMC) sont trop grossières pour traiter de la question des sources et puits de pollen, le modèle MM5, développé par Pasken et *al.* (2002), qui est un modèle régional de méso échelle à aire limitée, a été employé pour fournir des prévisions nécessaires au modèle HYSPLIT de trajectoire. Il est capable de fournir des prévisions précises sur une maille de 1 km<sup>2</sup> de même qu'il a la possibilité de faire différentes expériences à partir de schémas prédictifs de couche limite. Ce modèle est employé en conjonction avec le modèle HYSPLIT-4 (HYbrid Single particle Lagrangian Integrated Trajectory model) de la NOAA. Il permet de calculer le taux de dispersion à partir du profil vertical de diffusivité, le cisaillement du vent de même que la déformation du champ de vent dans l'horizontal. Combiné à une bonne connaissance de la biologie du pollen étudié, les sources d'émission peuvent être cartographiées à la fois dans le temps et dans l'espace. Les auteurs assurent que la combinaison des ces trois critères offre la possibilité de produire des prévisions polliniques fiables pour l'ensemble d'une région sur une période de 24 heures. Si jusqu'à présent, les études ayant employé le HYSPLIT modèle ont surtout cherché à faire une prévision soit de dépassement de seuil, soit d'occurrence ou d'absence de telle ou telle espèce pollinique, il est question avec le MM5 de faire une prévision de la distribution spatiale et temporelle du pollen. Cela implique la nécessité de modéliser la couche limite atmosphérique. De ce fait, les prévisions sont influencées tant par la précision de la modélisation que par celle du modèle de trajectoire. Les expériences menées dans la Grande Région de Saint Louis au Missouri par Pasken et *al.* (2002) portent sur le pollen de chêne dont les sources sont plus facilement localisables que le pollen d'ambrosie. Il s'agit d'un modèle imbriqué dans les deux sens qui fait appel à trois domaines de résolutions respectives 108, 36 et 12 km. Le plus grand d'entre eux est celui du continent Nord Américain dans lequel s'imbrique une fenêtre intermédiaire dont le domaine s'étend sur le Midwest Américain pour enfin parvenir à la plus petite fenêtre, centrée sur le l'Est du Kansas, le Sud de l'Iowa, le Missouri, le Nord de l'Arkansas et l'Illinois. Les prévisions proviennent de ce plus petit domaine. Le modèle HYSPLIT est configuré comme un modèle de dispersion et permet de modéliser la dispersion, la déposition et le transport du pollen. Les paramètres du pollen qui doivent être connus par le modèle sont sa taille, sa densité, un indice de forme et sa vitesse de sédimentation. Ce modèle permet la remise en

suspension du pollen déjà déposé au sol sous l'effet du vent. Environ 3000 points d'émission ont été considérés dans le modèle (Pietrowicz *et al.*, 2002) situés à 10 mètres au-dessus du sol. De plus, le cycle diurne de l'émission du pollen est considérée dans le modèle sachant que les pollens anémophiles sont généralement émis entre 06 :00 et 08 :30 am LST. Les résultats peuvent être analysés soit sous la forme de séries temporelles pour un point donné ou sous la forme de cartes pour un moment donné. Finalement les résultats d'une journée de simulation sont que les données simulées extraites d'un point donné auquel dans la réalité un bulletin pollinique est disponible toutes les 30 minutes, ne sont pas comparables en terme de quantités mais le sont du point de vue de la magnitude relative et du temps. Les auteurs notent que le premier pic pollinique du début de la journée est simulé à peu près au même moment que dans la réalité mais qu'en revanche le second pic, plus tardif n'est pas vu par le modèle. Ils avancent différentes hypothèses dont le passage d'un front froid accompagné de vents d'ouest qui proviennent de l'extérieur du domaine intérieur. La seconde est que des petites erreurs de prévision peuvent aussi avoir entraîné un déplacement dans l'espace du point auquel le pic a été mesuré dans la réalité (Pasken *et al.*, 2002). Une troisième hypothèse amenée par Pietrowicz *et al.* (2002) est que le jour précédent présentant des vents du Sud a du apporter du pollen qui s'est entre temps déposé. Or le modèle n'ayant simulé que la journée suivante, il n'a pas pu prendre en considération la remise en suspension de ce pollen. Les auteurs concluent de cette expérience très intéressante qu'il reste à consolider les prévisions météorologiques avec MM5 car d'elles dépend l'alimentation du modèle de dispersion. Il est aussi nécessaire d'approfondir toute la question du bilan pollinique en terme de gestion des sources et des puits, notamment celles du jour précédent. Un autre aspect est avancé qui est le manque de sites de mesures dans la région à l'étude qui permettraient une meilleure analyse de correspondance entre observation et simulation.

Le modèle RAMS<sup>10</sup> (Regional Atmospheric Modeling System) développé par Pielke *et al.* (1992) au Colorado State University compte également parmi cette catégorie de modèles. Il s'agit d'un modèle de prévision météorologique de méso échelle à aire limitée mais qui peut être configuré pour couvrir une région aussi grande qu'un hémisphère. Il emploie la méthode de l'emboîtement à double sens. C'est-à-dire que des domaines de tailles diverses s'imbriquent les uns dans les autres. Les conditions aux frontières sont imposées mais n'exercent leur effet que dans une zone tampon au-delà de laquelle, le domaine de plus petite taille développe ses propres conditions de circulation. Une technique de « nudging » est également impliquée qui permet le contrôle dans le petit domaine, des grandes ondes de manière à assurer une bonne qualité de « downscaling ». A titre d'exemple, ce modèle a été employé par Moore *et*

*al.* (2004) pour simuler le transport du scarabée du pin par le vent avec une résolution de 1 km et 25 niveaux dans la verticale durant la période du pic d'émergence. Pour parvenir à simuler le déplacement de ces insectes, RAMS doit être « alimenté » par les extrants du modèle lagrangien HYPACT<sup>11</sup> (Hybrid Particle and Concentration Transport Model) (Walko *et al.*, 2001), modèle de dispersion qui simule les mouvements des scarabées. Les extrants de RAMS sont ensuite employés pour alimenter un modèle de trajectoires à double sens afin de définir sources et puits.

Ces deux derniers modèles ou combinaisons de modèles présentés offrent des résultats intéressants qu'il faut comme dans chaque situation analyser en tenant compte des limites inhérentes aux modèles employés. Parmi celles-ci, notons que dans ces deux cas les simulations se font « off-line » c'est-à-dire que chaque module nécessite les résultats du précédent pour fonctionner. Les pas de temps d'archivages ne sont pas nécessairement les mêmes d'un exercice à l'autre si bien que l'on peut s'attendre à une perte d'information.

Une avant dernière expérience retient notre attention avant d'exposer notre propre modèle. Il s'agit de l'étude des allemands Helbig *et al.* (2003) qui publient les résultats de la simulation numérique qu'ils ont effectué à propos de la dispersion de pollen à l'échelle régionale. Ils ont employé pour cela le modèle KAMM/DRAIS. KAMM<sup>12</sup> (Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model) est un modèle de méso échelle non hydrostatique (Adrian *et al.*, 1991). Afin de calculer l'évolution dans le temps de la concentration, il est nécessaire de décrire le flux d'émission, le transport par le vent moyen, la diffusion turbulente, les processus de coagulation, sédimentation et déposition, remise en suspension et lessivage. Le modèle KAMM/DRAIS inclut un traitement des aérosols. Ils lui ont ajouté une nouvelle paramétrisation du flux de pollen ainsi que de la remise en suspension. Dans le cadre de cette expérience, la déposition comparativement à la sédimentation et la coagulation sont assumées négligeables, le lessivage n'est par ailleurs pas pris en compte. KAMM est couplé à un modèle de végétation qui détermine les conditions des frontières inférieures en terme de température et d'humidité. Le modèle DRAIS est quant à lui employé pour calculer la part du transport turbulent, réactions chimiques et comportement physique et chimique des aérosols. Il résout l'équation sur une grille eulérienne en employant le même terrain et en suivant le même système de coordonnées que KAMM. L'ensemble du système tourne en mode couplé. Les auteurs ont voulu déterminer les distances parcourues par les pollens en fonction des conditions atmosphériques ainsi qu'évaluer les variabilités spatiales et temporelles des concentrations. Ils ont pu remarquer qu'en produisant une météorologie en 3D, le pollen sédimentaient moins rapidement et les concentrations de pollen pouvaient même croître en cours

<sup>10</sup> Site internet du modèle RAMS consulté le 27.09.05 : <http://www.atmet.com/>

<sup>11</sup> Site internet du modèle HYPACT consulté le 27.09.05 : [http://atmet.com/html/docs/hypact/1.2.0/hyp\\_ug-1.2.0.htm](http://atmet.com/html/docs/hypact/1.2.0/hyp_ug-1.2.0.htm)

<sup>12</sup> Site internet du modèle KAMM consulté le 27.09.05 : <http://www.risoe.dk/ita/regneserver/projects/kamm.htm>

<sup>13</sup> Groupe NTT : site <http://kankyo.lelab.ecl.ntt.co.jp/eng/research/environment/information.html#pollen> consulté le 08/12/05

de journée témoignant ainsi de l'effet de la circulation atmosphérique et de la composante verticale du vent. Ils ont aussi pu remarquer que les pics de concentration n'avaient pas lieu à proximité des sources d'émission mais étaient directement influencés par la topographie et son effet sur la circulation atmosphérique locale. Ainsi le temps de vie du pollen dans l'atmosphère entre source et puits est augmenté. Par ailleurs, 10% de la quantité de pollen émise sédimente à proximité du point où il est émis. Ces aspects très intéressants se rapprochent de ce que nous faisons nous-mêmes. Nous ne rentrerons pas dans le détail de notre expérience à ce niveau du manuscrit puisque le chapitre IV y est consacré mais nous pouvons dire que notre étude s'inscrit dans la lignée de celles que nous venons de présenter et constitue une évolution très encourageante vers la modélisation numérique d'un nuage de pollen.

Une dernière expérience mérite l'attention. La compagnie autrichienne ESS (Environmental Software and Services) propose sur son site web un certain nombre de démos interactifs (<http://www.ess.co.at/DEMOS/>, consulté le 08/12/05). Parmi eux, un est dédié à la prévision du pollen de cèdre à Kando, au Japon. Ce système d'information baptisé « POLLEN » est développé par le groupe NTT<sup>13</sup>. Ce système propose des échantillonnages de pollen automatiques et permet à l'utilisateur d'obtenir un bulletin pollinique mis à jour à partir de données horaires. Il propose également une fonction de simulation qui semble prévoir le volume de pollen qui risque de se déplacer dans les 48 heures au plus, tous les 2 km. Ainsi des cartes sont disponibles qui présentent cette évolution spatiale et temporelle en temps réel.

Le dernier modèle qui entre dans cette catégorie, est le MRCC. Le chapitre 3 lui est dédié aussi ne nous décrirons pas toutes ses fonctionnalités ici. Nous pouvons toutefois préciser que les équations numériques qui le composent, sont fondées sur le noyau dynamique du modèle de méso-échelle compressible communautaire (MC2) décrit dans Bergeron *et al.* (1994) et mis au point par André Robert et ses collègues du Centre coopératif de recherche à méso-échelle (CCRM) (Laprise *et al.* 1997). Ce dernier est basé sur les équations de champ d'Euler, non hydrostatiques et entièrement élastiques, résolues au moyen d'un algorithme directeur semi-implicite et semi-lagrangien (SISL) des plus perfectionnés et qui permet le calcul de la circulation atmosphérique à toutes les échelles spatiales. Les variables atmosphériques du MRCC (e.g., pression de l'air, température, vent, humidité, précipitations, évaporation, humidité du sol) sont discrétisées sur une grille entrelacée de type C d'Arakawa, en projection stéréographique polaire à l'horizontale et en coordonnées verticales de Gal-Chen (Gal-Chen et Somerville, 1975) dont le premier niveau suit la topographie. L'efficacité du mécanisme SISL permet l'utilisation de pas de temps plus longs (au moins par un facteur de 5) par rapport

aux autres modèles régionaux climatiques pour une même résolution spatiale. Afin de réaliser une simulation numérique d'un nuage d'ambrosie, il a fallu agrémenter le MRCC d'un module apportant les caractéristiques nécessaires au traitement du pollen au même titre qu'un traceur. Ce pollen est pris en charge de la même manière que les variables atmosphériques. La méthode employée pour simuler ces conditions atmosphériques et polliniques de fine résolution spatiale est dite : méthode par emboîtement (downscaling technique). Elle offre de passer d'une échelle de 49 Km de résolution, à 7 puis 1 Km dans la région de Montréal. Nous disposons de 3 échelles d'information météorologique de l'échelle synoptique, à l'échelle régionale puis locale. La trajectoire aérobiologique n'est, quant à elle, disponible qu'à la plus fine résolution, ceci principalement du fait du problème de la localisation et de la détermination des sources de plus grande échelle que nous aborderons en détail ultérieurement. Nous assumons en revanche disposer d'une assez bonne représentation des sources locales au sein du modèle, celles-ci ayant été numérisées à partir des résultats d'un inventaire réalisé sur le terrain en 1990 par Collins sur l'île de Montréal.

---

## CHAPITRE 2 – APPROCHE STATISTIQUE

*L'approche statistique est la première méthode d'investigation et d'analyse proposée en vue d'étudier le comportement du nuage pollinique d'ambrosie au-dessus de la Grande Région de Montréal. Un grand nombre de données sont disponibles qui touchent tant aux concentrations journalières moyennes de pollen mesurées en quatre points différents de l'île qu'aux paramètres météorologiques mesurés à l'aéroport international de Montréal à Dorval durant les saisons polliniques 1994 à 2003. Des statistiques non paramétriques sont employées. Dans un premier temps, les conditions polliniques sont détaillées et ces analyses offrent la possibilité de mettre à jour disparités et similitudes inter stations et interannuelles. La décennie étudiée est marquée par une période particulièrement pollinique avec les années 1998 à 2001. De cette analyse découle une détermination du risque d'allergie et de son évolution spatio-temporelle, suivant la classification employée par la Ville de Montréal. Il apparaît qu'en dépit du fait qu'aucune différence statistiquement significative n'est identifiée, certains sites demeurent toujours plus polliniques que d'autres probablement du fait de leur localisation par rapport à l'abondance des sources. Il apparaît aussi, que la situation demeure néanmoins globalement critique à Montréal, quelque soit le site et quelque soit l'année, le niveau du seuil clinique correspondant au risque faible étant largement dépassé au cours de chacune des saisons analysées. Afin d'établir des relations entre saisons polliniques et conditions atmosphériques, un intérêt particulier est accordé aux conditions météorologiques expérimentées. Il apparaît au cours de la décennie étudiée que Montréal a connu de 1998 à 2001 une série de printemps et étés plutôt anormalement secs et chauds qui semblent être assez fortement associés aux saisons les plus polliniques. Outre les facteurs thermiques positivement corrélés aux quantités échantillonnées, le facteur vent est un paramètre déterminant de la provenance du pollen. Cette approche conduit à une analyse plus globale du risque en fonction d'une caractérisation du temps à Montréal par le biais de types de temps issus d'une classification connue. Il est alors possible d'identifier des situations météorologiques plus ou moins « à risque » tenant compte tant de leur fréquence d'occurrence que de leur contribution à la charge pollinique globale saisonnière. Il en ressort que les plus fréquentes sont aussi les plus grandes contributrices, mais qu'il ne faut pas négliger pour autant d'autres situations qui, du fait de leur rareté, ne pèsent pas aussi lourd dans la balance pollinique mais qui au cas par cas peuvent s'avérer extrêmement risquées.*

---





## CHAPITRE 2

Ce chapitre a pour but l'analyse statistique des données polliniques et météorologiques observées entre 1994 et 2003 à Montréal durant la saison de pollinisation de l'ambrosie. L'objectif est de mettre en relation les conditions atmosphériques du moment avec les concentrations de pollen mesurées en différents sites ; afin de caractériser le comportement de ce pollen de fin d'été dans la région montréalaise. Il s'agit donc de mettre à jour des relations statistiques significatives plus ou moins fortes entre paramètres météorologiques et polliniques de manière à écrire l'« histoire » de l'ambrosie durant sa phase aéroportée. L'étape suivante et ultime du chapitre 3 sera de confronter ces résultats statistiques à ceux de simulations numériques réalisées à l'aide du MRCC.

Deux séries de données sont analysées. La première concerne les données météorologiques. Il s'agit de paramètres classiques que nous employons sur une base quotidienne. Comtois (1987) affirme qu'une fois émis dans l'air, les grains de pollen se trouvent en équilibre hydrostatique sous les conditions atmosphériques prévalentes et que les deux facteurs les plus influents sur les concentrations sont la température moyenne ( $T_{moy}$ ) et le total des précipitations ( $Prec$ ). Outre ces deux paramètres, nous avons aussi traité un ensemble d'autres variables qui sont : la température minimale ( $T_{min}$ ) et maximale ( $T_{max}$ ), l'humidité relative minimale ( $HR_{min}$ ) et maximale ( $HR_{max}$ ), la vitesse ( $V_{itv}$ ) et la direction du vent ( $Dir_v$ ), l'insolation ( $Ins$ ), les degrés jours de croissance ( $DD > 5^\circ$ ) et la pression atmosphérique ( $P_{msl}$ ). Elles proviennent de l'Aéroport International Pierre-Elliott Trudeau de Montréal et ont été gracieusement mises à notre disposition par Environnement Canada. Nous considérons que ces données sont représentatives des conditions atmosphériques régionales. Parallèlement, une approche « par type de temps » est proposée et nous voyons comment cette classification peut contribuer à faciliter le traitement de l'information météorologique. La classification développée par Sheridan (2002) pour l'Amérique du Nord offre la possibilité de synthétiser les conditions du temps d'une journée particulière au-dessus d'un point donné, en lui attribuant les caractéristiques d'un type spécifique de masse d'air.

La seconde série de données concerne les données polliniques. Elles proviennent de 4 sites répartis sur l'île de Montréal et sont issues de bases de données

gracieusement mises à notre disposition par le Dr M. Garneau de l'UQAM et la Ville de Montréal. Ces données sont journalières et toujours disponibles pour au moins 2 sites sur les 4 entre le début d'août et la fin septembre des années 1994 à 2003. Une description ultérieure des stations de mesure offre quelques précisions quant à leur origine, leur traitement et signification. Nous travaillons à partir de ces données brutes en premier lieu puis en les ordonnant selon l'échelle de risque de la ville de Montréal. Si les relations entre concentrations polliniques et types de temps et plus encore entre niveaux de risque et types de temps sont bien marquées alors l'intérêt pourrait être de contribuer à faciliter la prévision future des conditions polliniques ou tout au moins des risques encourus par la population.

La classification des paramètres météorologiques telle que présentée par Laaidi *et al.* (1997) retient notre attention. Au delà de la trajectoire aérobiologique elle-même, les auteurs répartissent les paramètres météorologiques influents des conditions polliniques selon trois catégories : les paramètres météorologiques primaires, secondaires et tertiaires. Les facteurs de la première catégorie interviennent sur la biologie des espèces végétales au moment de la croissance des plantes et du développement des fleurs. Ces facteurs conditionnent donc les quantités potentielles de pollen produites ultérieurement durant la saison pollinique. Parmi ces facteurs, le plus déterminant concerne probablement le cumul des températures sur l'ensemble de la période de croissance de la plante à partir de la levée de la dormance hivernale. Les meilleurs indicateurs de ceci sont les degrés jours de croissance. Dans le cas présent, nous considérerons les degrés jours de croissance au-dessus de  $5^\circ C$  à compter du 1<sup>er</sup> avril de chaque année. Nous verrons si ce cumul des degrés jours de croissance est déterminant du type de saison pollinique vécu à Montréal au cours de la dernière décennie. Un autre paramètre intéressant dans ce contexte-là est l'ensoleillement qui conditionne bien évidemment la température. Outre cette relation privilégiée, il est également indispensable pour le bon développement des bourgeons floraux. Finalement, pour que croissance se fasse, la pluie est indispensable. Les précipitations printanières doivent être suffisantes. Nous tâcherons de mettre en évidence quelle relation existe entre ensoleillement et précipitations au regard des saisons polliniques. Nous nous demandons qui de la

réurrence ou de la quantité de précipitations et à quel moment au cours du printemps, a le plus de signification sur les quantités de pollen émises ultérieurement. Nous regarderons aussi si l'ensoleillement a un effet sur le démarrage de la saison. Les facteurs secondaires interviennent quant à eux, lors de la libération des grains de pollen. Comme le rappellent les auteurs, parvenu à la maturité des bourgeons floraux, un excès d'humidité relative (supérieure à 80%), freine l'ouverture des étamines et rend donc impossible la libération du pollen dans l'air, tout comme des précipitations abondantes empêchent l'ouverture des capitules. Toutefois un peu d'humidité modérée favorisant la turgescence des cellules suivie d'air plutôt sec entraîne l'éclatement des sacs polliniques en début de journée (Bianchi *et al.*, 1959). La pression intervient aussi. Elle contrôle au moins en partie l'ouverture des fleurs. En effet des conditions synoptiques de haute pression associées à une température de l'air optimale (connaissant une forte progression au cours de la journée) constituent les conditions les plus favorables à la libération du pollen. Nous pouvons ainsi nous attendre à ce que les jours de plus forte pollinisation correspondent à des jours où l'on a conjonction d'absence de précipitations, de beau temps sec et chaud, d'amplitudes thermiques notables entre fin de nuit et jour et de conditions anticycloniques. Comtois *et al.* (1991) et Raynor *et al.* (1970) ont montré par ailleurs que les concentrations au jour le jour sont déterminées par la température moyenne de l'air deux jours avant. Enfin, les facteurs dits tertiaires sont ceux qui interviennent au cours du trajet aérien des pollens. Leurs effets sur les grains de pollen sont cruciaux du point de vue de l'allergologie, donc de la santé de la population. Suivant les conditions, soit le pollen retombe très rapidement après son émission limitant ainsi les risques encourus, soit il voyage dans l'air, accroissant ainsi les risques. A cette étape-ci de son existence, le paramètre vent et plus précisément les mouvements horizontaux et verticaux de l'atmosphère sont déterminants. Il en est de même d'une température ambiante relativement élevée qui cumulée à une brise légère à modérée favorise la prise en charge du pollen par l'air (Comtois, 1995). Les auteurs rappellent que presque 80% des grains émis se déposent à moins de 500 mètres de leur source et 20% à moins de 10 km mais l'infime fraction restante, aéroportée, peut monter à 2000 mètres d'altitude et parcourir jusqu'à 800 km en 24 heures. Cette distance jusqu'à laquelle le pollen va voyager est fonction de la force et de la direction du vent mais aussi de son régime plus ou moins turbulent. D'autres facteurs doivent également être considérés. Il s'agit des paramètres morphologiques des pollens eux-mêmes, notamment du poids, de la taille et de la forme plus ou moins aérodynamique. Concernant cette phase aéroportée du pollen, les précipitations sont également importantes puisqu'elles ont tendance à limiter les quantités de pollen dans l'air.

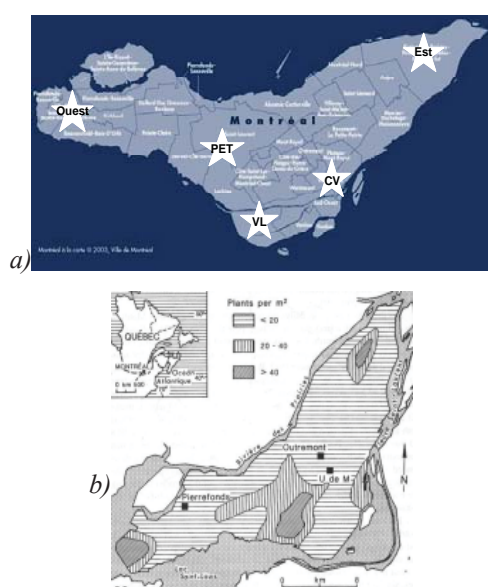
Précisons enfin que les données analysées dans le cadre de ce chapitre ne concernent que la phase aéroportée du pollen. Ni émission, ni dépôt ne peuvent être traités. La distribution spatiale des sites de mesure devrait nous permettre d'estimer en revanche l'impact des conditions du milieu en plus des conditions atmosphériques régionales sur les comptes polliniques. Il n'est pas rare en effet de trouver des concentrations variant du simple au double pour un moment donné sur deux sites localisés différemment par rapport à la provenance dominante des masses d'air (Fischbach, 1983). Il est intéressant à ce propos de définir la notion de risque associé à l'emplacement. La plupart des malades ne sont en effet pas conscients des fluctuations des concentrations du pollen en fonction du temps, dans l'espace et sous l'effet de conditions météorologiques de différentes échelles. Il est su pourtant que le niveau de risque peut être notablement réduit si la personne allergique à l'ambrosie est en mesure de déplacer ses activités extérieures à l'intérieur (Fischbach, 1983) pendant les pics de pollinisation. Dans cette même étude, l'auteur estime que chaque nouvelle journée initie une nouvelle décharge de pollen local de bonne heure le matin à laquelle s'adjoint en cours de journée du pollen « voyageur » transporté par le vent. Dans le cas cité, plus de 50% du total des concentrations quotidiennes sont mesurées avant midi, puis décroissent au fil des heures de l'après midi, de la soirée et finalement de la nuit. Une personne allergique doit donc vraiment éviter de sortir avant midi et préférer les sorties de fin de journée si elle peut s'en accommoder.

Cette démarche nous conduit ainsi dans un premier temps à caractériser les saisons à l'étude par le biais d'une description détaillée des données polliniques et de leur signification spatio-temporelle. Préalablement, des analyses préliminaires permettent de caractériser les échantillons et de définir la statistique à appliquer. Nous nous intéressons aussi à savoir s'il est possible de distinguer au cours de ces 10 années de mesures un quelconque signal de variation du aux effets des changements climatiques. Suit une analyse des conditions météorologiques des printemps et étés respectifs à l'échelle synoptique qui descend ensuite à l'échelle de la région montréalaise à partir des données de l'aéroport. Les conditions du printemps nous intéressent car il est en effet déterminant de l'allure de la saison pollinique (Laaïdi *et al.*, 1997). Nous pouvons ensuite mettre en relation données météorologiques et données polliniques, toutes saisons et tous sites confondus ou par saison et par site. La dernière étape est de travailler à partir des niveaux de risque et de la classification des types de temps afin de parvenir à établir des relations intéressantes entre ceux-ci, ce qui faciliterait beaucoup de travail d'information du public par les collectivités locales.

## 1. Données disponibles et démarche suivie

Les données polliniques proviennent de 4 stations disséminées « au quatre coins » de l'île de Montréal (Figure 2.1). A la Figure 2.1b nous trouvons une carte permettant de localiser les principaux foyers de plants d'ambrosie tels que relevés à l'occasion d'un inventaire sur le terrain (Collins, 1991). Nous considérons les mesures effectuées entre le 01 août et le 30 septembre de chaque année.

La première série de données provient de Ville Lasalle<sup>1</sup>, localité située dans le SE de l'île. « La municipalité qui date de 1912 est littéralement entourée d'eau : le canal de Lachine la borde au nord, le canal de l'Aqueduc la traverse de part en part, et la berge du fleuve constitue un seul grand parc long de huit kilomètres. À partir des années 20, de nombreuses industries choisissent de s'y établir, attirées par la présence du chemin de fer et du canal de Lachine. L'arrivée de la distillerie Seagram, des levures Fleischmann's, de la brasserie Labatt et des Aliments Kraft a créé petit à petit un pôle industriel principalement axé sur l'agro-alimentaire. Autour de ces industries se sont greffés des quartiers résidentiels paisibles et d'importants secteurs commerciaux ». Un important réseau routier et autoroutier sillonne par ailleurs ce quartier. La station de mesure (VL) se situe à environ 1 km au Nord du fleuve Saint-Laurent et à 9 km à vol d'oiseau au Sud de l'Aéroport International Pierre-Elliott Trudeau.



Figures 2.1: a) Carte des arrondissements de Montréal. Les étoiles indiquent l'emplacement approximatif des stations de mesures polliniques ainsi que celui de l'Aéroport International Pierre Elliot Trudeau. b) Cartes de localisation des foyers d'ambrosie sur l'île de Montréal d'après un inventaire effectué sur le terrain par Collins (1991)

La station pollinique est la propriété de la compagnie Aerobiology Research Laboratories<sup>2</sup> qui n'a pas souhaité divulguer la localisation exacte de celle-ci par crainte de manque de confidentialité. Les droits des données polliniques des années 1994 à 2002 ont été acquis par le Dr. Michèle Garneau qui les a gracieusement mises à notre disposition. Cette compagnie collecte et compte les échantillons de pollen à l'aide d'un échantillonneur volumétrique rotatif par impaction de type « GRIPST-2000 ». Il s'agit d'un échantillonneur de récolte synchronisé. Pour plus d'information technique concernant ce capteur se référer à l'Annexe 2.2. Les échantillons sont relevés quotidiennement entre 07 :00 et 08 :00 HAE<sup>3</sup>, soit entre 11 :00 et 12 :00 UTC (Aerobiology Research Laboratories, 2001).

Les trois autres séries de données proviennent de stations d'échantillonnage de la qualité de l'air entretenues par les services de la Direction de l'Environnement de la Ville de Montréal<sup>4</sup> et gracieusement prêtées par Monsieur Claude Gagnon. Ces trois stations sont équipées de capteurs volumétriques de type Hirst-Burkard dont une description est faite en Annexe 2.2. Une station est localisée en centre-ville (CV), les deux autres respectivement aux extrémités Est et Ouest de l'île. Une importante distinction doit être faite entre ces stations. La première au centre-ville se trouve dans un environnement urbain dense alors que les deux autres se situent au milieu de terres agricoles et/ou de terrains vagues et résidentiels. La station « Centre-ville » se situe au 1212, de la rue Drummond, dans l'arrondissement Ville-Marie et est localisée à 15 m du sol (Photo 2.1). La station d'échantillonnage « Est » est localisée au 12 400, de la rue Wilfrid-Ouellette, dans l'arrondissement Rivière des Prairies – Pointe aux Trembles – Montréal Est. Elle est placée à 4 mètres au-dessus du sol (Photo 2.2). Enfin, la quatrième station se situe au 20 965 du chemin Sainte Marie, dans l'arrondissement Ile Bizard – Sainte Geneviève – Sainte Anne de Bellevue. La hauteur de la station est de nouveau à 4 mètres (Photo 2.3) du sol.

Les quatre bases de données polliniques ne correspondent pas toutes exactement à la même période. La station Ville Lasalle a fonctionné de 1994 à 2002, la station CV de 1996 à 2003, les stations Est et Ouest de 1997 à 2003. Nous pouvons toutefois considérer que nous disposons en tout d'une période de 10 années de données polliniques. Au même titre que nous avons vérifié la normalité des échantillons polliniques (Tableau A2.3-5), un certain nombre de tests préliminaires ont été appliqués à ces données de manière à contrôler différents points avant d'entreprendre l'analyse à proprement parler des saisons polliniques. Nous présentons les résultats de ces tests dans la prochaine section.

<sup>2</sup> Aerobiology Research Laboratories : <http://www.pollenplus.com/>

<sup>3</sup> HAE = UTC - 4 heures (HAE : heure avancée de l'Est, UTC ou GMT : temps universel)

<sup>4</sup> Direction de l'Environnement de la Ville de Montréal : <http://www.rsqa.qc.ca/framville.asp?url=framrsqf.asp>



Photo 2.1 : Station CV (RSQA)



Photo 2.2 : Station Est (RSQA)



Photo 2.3 : Station Ouest (RSQA)

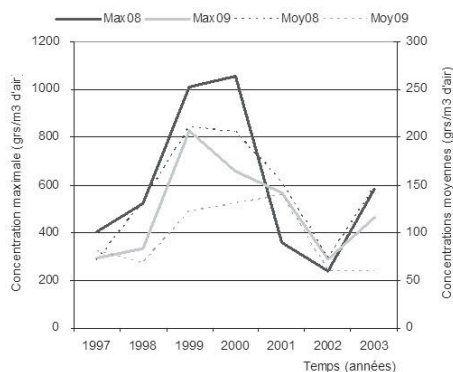


Figure 2.2 : Station Ouest – Statistiques descriptives

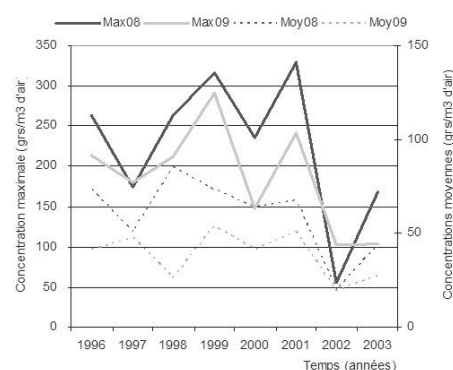


Figure 2.3 : Station Ville Lasalle – Statistiques descriptives

## 2. Description des saisons polliniques de 1994 à 2003

### 2.1. Variation spatio-temporelle des quantités de pollen

#### i. Fluctuations spatiales inter annuelles

Les Tableaux A2.1-1 à A2.1-4 ainsi que A2.3-19 à A2.3-21 affichent les paramètres relatifs aux concentrations polliniques totales mesurées à chaque station durant les saisons étudiées. Les Figures 2.2 à 2.5 proposent, par station, l'évolution temporelle des concentrations totales et moyennes. On retrouve pour cela sur l'axe des ordonnées de droite la concentration pollinique saisonnière totale ainsi que la moyenne quotidienne au cours de la saison donnée et sur l'axe de gauche, la concentration maximale atteinte au cours de la saison. Les courbes polliniques saisonnières du 01/08 au 30/09 de chaque année sont présentées à la Figure 2.6. La Figure A2.3-1 offre une autre représentation graphique de l'évolution d'année en année des quantités de pollen totales mesurées aux quatre stations.

Les courbes de concentration d'ambrosie mesurées entre 1994 et 2003 (Figure 2.6) à Montréal, montrent que la saison démarre toujours plus ou moins avec les premiers jours d'août et s'achève vers la fin septembre. En termes d'amplitude, suivant les années concernées mais aussi suivant la station considérée, la valeur du pic maximal peut fluctuer de même que les quantités mesurées au quotidien. La station Ouest présente en principe des comptes beaucoup plus importants que les trois autres. Les valeurs quotidiennes moyennes mesurées sur l'île de Montréal entre le 1<sup>er</sup> août et le 30 septembre de chaque année se situent avec la station Ouest à 69 grains  $m^{-3} j^{-1}$  et sans elle autour de 53 grains  $m^{-3} j^{-1}$ . D'année en année, la plupart des pics majeurs de pollen ont lieu entre le 15 août et le 10 septembre. Il s'agit vraiment-là du cœur de la saison.

Le pic majeur moyen de la décennie à l'étude et moyenné sur l'île est de 335 grains/ $m^3$  pour 24 heures. En réalité, il est fortement influencé par la station Ouest qui connaît, durant la période 1997-2003, un pic maximal moyen de 632 grains pour 24 heures alors que les trois autres stations se situent en moyenne autour de 260 grains  $m^{-3}/24$  heures. La consultation des Tableaux A2.3-19 à A2.3-21 permet de montrer que d'année en année, à part en 2002, la station Ouest détient le record du maximum annuel. Le second maximum est atteint soit dans l'Est en 1997, 1998 et 2000, soit au centre ville en 1999, 2001 et 2003. Nous devons retenir qu'en général l'écart



entre ces deux dernières stations n'est pas si important. L'année 2002 quant à elle, apparaît assez spéciale avec des maxima beaucoup plus faibles que la normale au Centre Ville, dans l'Est et dans l'Ouest et un maximum plus important qu'au cours des années antérieures à Ville Lasalle et également supérieur à ceux atteints dans les trois autres stations.

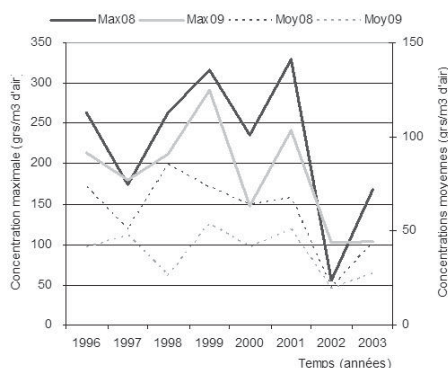


Figure 2.4 : Station Centre Ville – Statistiques descriptives

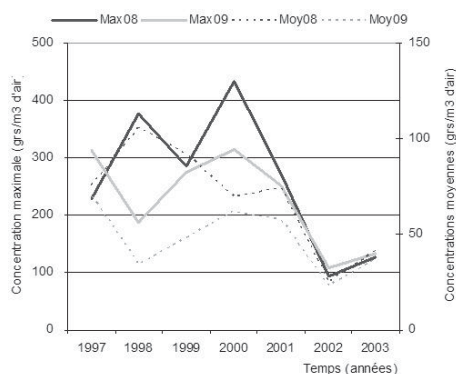


Figure 2.5 : Station EST – Statistiques descriptives

Concernant les quantités de pollen totales recueillies pendant la période à l'étude, deux stations se démarquent des deux autres. Il s'agit des stations Ouest et Est. La station Ouest compte en effet un total moyen saisonnier sur 7 ans de 6774 grains m<sup>-3</sup> d'air avec un total annuel passant de 3279 grains en 1997 à 9906 grains en 2000 et la station Est de 3359 grains m<sup>-3</sup> pour la même période, passant quant à elle de 1465 grains en 2002 à 4366 grains en 1997. Ces deux totaux passant de l'Est à l'Ouest du simple au double, sont beaucoup plus importants que ceux obtenus dans les deux autres stations, Ville Lasalle et Centre Ville où les totaux moyens sont d'un ordre de grandeur semblable (+/- 2700 grains m<sup>-3</sup> an<sup>-1</sup>). Le nombre total saisonnier de grains comptés sur l'île de Montréal varie donc entre 3400 et 2900 grains en moyenne suivant que l'on considère la station Ouest ou pas. D'année en année, elle détient en principe le record du total à part en 2002. En 1997, la station Est présente formellement dans les chiffres, un total significativement plus important que la station Ouest puisque la différence s'avère être de plus de 1000 grains pour la saison. Il faut cependant relativiser

cette observation. Il manque en effet un bon nombre de données cette année-là à l'Ouest. De 1998 à 2001 ainsi qu'en 2003, la station Ouest ne cède pas sa place. Le total saisonnier variant alors de 5932 à 9906 grains. De 1998 à 2001 et en 2003, la station Est arrive en deuxième position suivie de très près par la station CV. On peut dire que ces deux stations connaissent annuellement, des conditions polliniques très comparables et même si les pics majeurs sont en principe plus marqués dans l'Est, les totaux saisonniers demeurent tout à fait comparables. Les quantités moyennes enregistrées par jour sont également un peu plus importantes dans l'Est qu'au Centre-Ville.

Un certain nombre de disparités sont donc apparentes mais des recouvrements sont aussi possibles. Afin de voir si ces différences sont statistiquement significatives les unes par rapport aux autres, d'année en année, des tests pour échantillons appariés ont été effectués sur ces données et dont les résultats sont proposés dans le Tableau A2.3-12. Il a été considéré que les échantillons étaient liés par le fait qu'ils étaient de la même année et que durant un même été, les conditions atmosphériques devaient avoir plus d'influence sur les concentrations polliniques que l'emplacement des sites eux-mêmes. Nous avons formulé l'hypothèse selon laquelle a priori, au moins d'un point de vue régional, ces conditions atmosphériques devraient être globalement les mêmes. Chaque échantillon correspond à une saison pollinique donnée pour une station particulière. En faisant ce choix du test t de Wilcoxon (Tableau A2.3-1) qui s'applique sitôt que le test paramétrique de comparaison de moyennes pour échantillons appariés ne s'applique plus, apparaissent des différences significatives entre toutes les stations. Nous en déduisons que d'année en année, les différences de quantités de pollen mesurées entre les stations sont significatives voire hautement significatives. Les sites se comportent alors de façon significativement différente, toutes les années. Concernant l'année 1996, notons que 10 jours sur 61 ont été éliminés des comparaisons du fait de données manquantes. Pour les autres années, des tests de comparaisons multiples ont été effectués pour déterminer quelles stations se comportent de façon dissemblable par rapport aux autres, d'année en année. En 1994 et 1995 il est impossible de caractériser le comportement de la spora pollinique d'un site de mesure à un autre, ne disposant d'aucune autre station de mesure à part celle de VL. Ce que nous pouvons toutefois dire en terme de quantités totales mesurées ces deux années-là, est qu'elles sont du même ordre de grandeur que celles mesurées à la même station en 1996 et 1997. A partir de 1998, les quantités augmentent de façon significative à VL. Entre 1996 et 2003, une palette de possibilités de réponse s'offre à nous.

Des tests de comparaisons multiples (Tableau A2.3-12) et de l'observation des graphiques (Figure 2.6), la station ouest se différencie la plupart du temps de l'ensemble



des autres. Les maximums des concentrations mesurées ici sont toujours de 1.5 à 2 (1998-2001), voire 4 (2002) et même 6 fois (2003) plus importants ici que les maximums des autres stations. Cette station connaît chaque année des concentrations maximales en moyenne 2 à 3 fois plus fortes qu'ailleurs. Nous notons sur la Figure 2.7 une tendance à l'augmentation de ces quantités entre les années 1997 et 2003 avec un paroxysme de 1999 à 2001. Le summum est notamment atteint en 2000 avec un total de près de 10 000 grains comptés entre le 1<sup>er</sup> août et le 30 septembre. L'année 1999 est très proche. Suit ensuite une chute brutale des concentrations au cours de l'été 2002 puis une remontée en 2003 semblable aux valeurs de 1998. Le creux observé en 2002 est de la même envergure que celui enregistré en 1997. Notons toutefois qu'en 1997 un grand nombre de données manquent qui, si l'on se fie aux Figures 2.2 à 2.5, correspondent au plein cœur de la saison. Nous retenons que 1999 et 2000 sont deux années particulièrement productives et qu'en revanche, 2002 a connu une très faible productivité pollinique notamment dans les stations habituellement plus « polliniques ». Le pic maximum le plus fort atteint durant la décennie à cette station a lieu en 2000 avec un total pour 24 heures de 1 053 grains m<sup>-3</sup> d'air (valeur absolument énorme toutefois semblable à celle obtenue en 1999 (1 010 grains m<sup>-3</sup>)) ce qui représente plus de 3 fois la moyenne (335 grains m<sup>-3</sup> d'air) obtenue au cours des 10 ans, toutes saisons et tous sites confondus. La valeur de pic la plus petite a lieu en 2002 et elle est de 40 grains inférieure à la valeur moyenne. 2003 semble être une année de reprise.

Allant d'Ouest vers l'Est, la station suivante est celle de Ville Lasalle. Elle connaît une évolution temporelle par palier, caractérisée par 3 niveaux différents avec des moyennes passant de 26 grains m<sup>-3</sup> d'air par jour à 32, puis 40.5 (Figure 2.7 a et b). Le premier palier se situe pendant les années 1994 à 1997 incluse, avec des totaux saisonniers ne dépassant pas les 2 000 grains/m<sup>3</sup> d'air et des maxima autour de 200 grains par 24 heures. Le palier suivant englobe les années 1998 à 2000. Les valeurs des maxima dépassent dans tous les cas les 200 grains et celles des totaux, sont comprises entre 2 000 et 3 000 grains pour la saison. Enfin, les deux dernières années pourraient constituer l'amorce d'un nouveau palier dépassant les 300 grains de maxima et avoisinant en 2002, les 5 000 grains pour la saison soit plus de 2,5 fois la situation de la fin des années 90. Cette station se comporte donc de manière très différente avec des comptes plus élevés que partout ailleurs et non seulement sur une journée mais durant l'ensemble de la saison en 2002. La comparaison des maxima et concentrations totales (Figure 2.7) amène au même constat.

Passant au CV, les maxima y sont dès 1996 plus forts qu'à VL mais de moitié moins forts que dans l'Ouest. La tendance des concentrations mesurées est plus stable dans le temps qu'aux autres stations en général et ceci jusqu'à

la chute des concentrations en 2002 particulièrement bien marquée. Puis 2003 semble redémarrer. De 1996 à 2001, tous les totaux saisonniers dépassent bien (1998-2001) ou avoisinent (1996-1997) les 3 000 grains pour la saison. (cf. fig. 2.6 page 68)

Les maxima varient entre 180 en 1997 et plus de 300 en 1999 et 2001. L'année la plus sévère pour les allergiques, fut 1999 au centre ville.

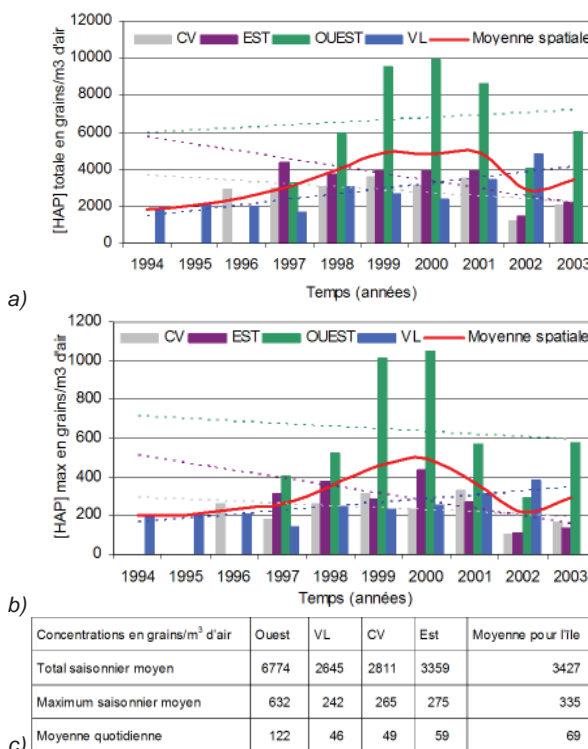


Figure 2.7 : a) Concentrations polliniques totales saisonnières aux 4 stations de mesure et tendances, comparées à la moyenne spatiale. b) Concentrations polliniques maximales par année et par site, comparée à la valeur moyenne obtenue pour l'île. c) Totaux et maximum saisonniers ainsi que moyennes quotidiennes moyennés dans le temps et l'espace sur la période 1994-2003

Enfin, dans l'Est de l'île, nous retrouvons un profil semblable à celui du centre ville avec des valeurs toujours plus fortes mais un même plateau de 1997 à 2001, suivi d'une chute en 2002 et d'une remontée en 2003. L'année 2000 est une année importante dans l'Est de l'île en termes de maximum atteint qui bien que deux fois moins élevé que dans l'Ouest est toutefois presque deux fois plus élevé qu'à VL et au CV. Les années 2002 et 2003 sont absolument comparables dans l'Est avec ce qui se passe au centre ville. En termes de quantité on peut dire que ces deux stations ont essuyé 3 fois moins de pollen environ en 2002 que l'Ouest et VL. Les courbes sont de faible amplitude durant toute la saison 2002 (Figure 2.6) dans l'Est comme au CV. Les concentrations sont, sur une base quotidienne, 2 à 3 fois moins élevées que dans l'Ouest.

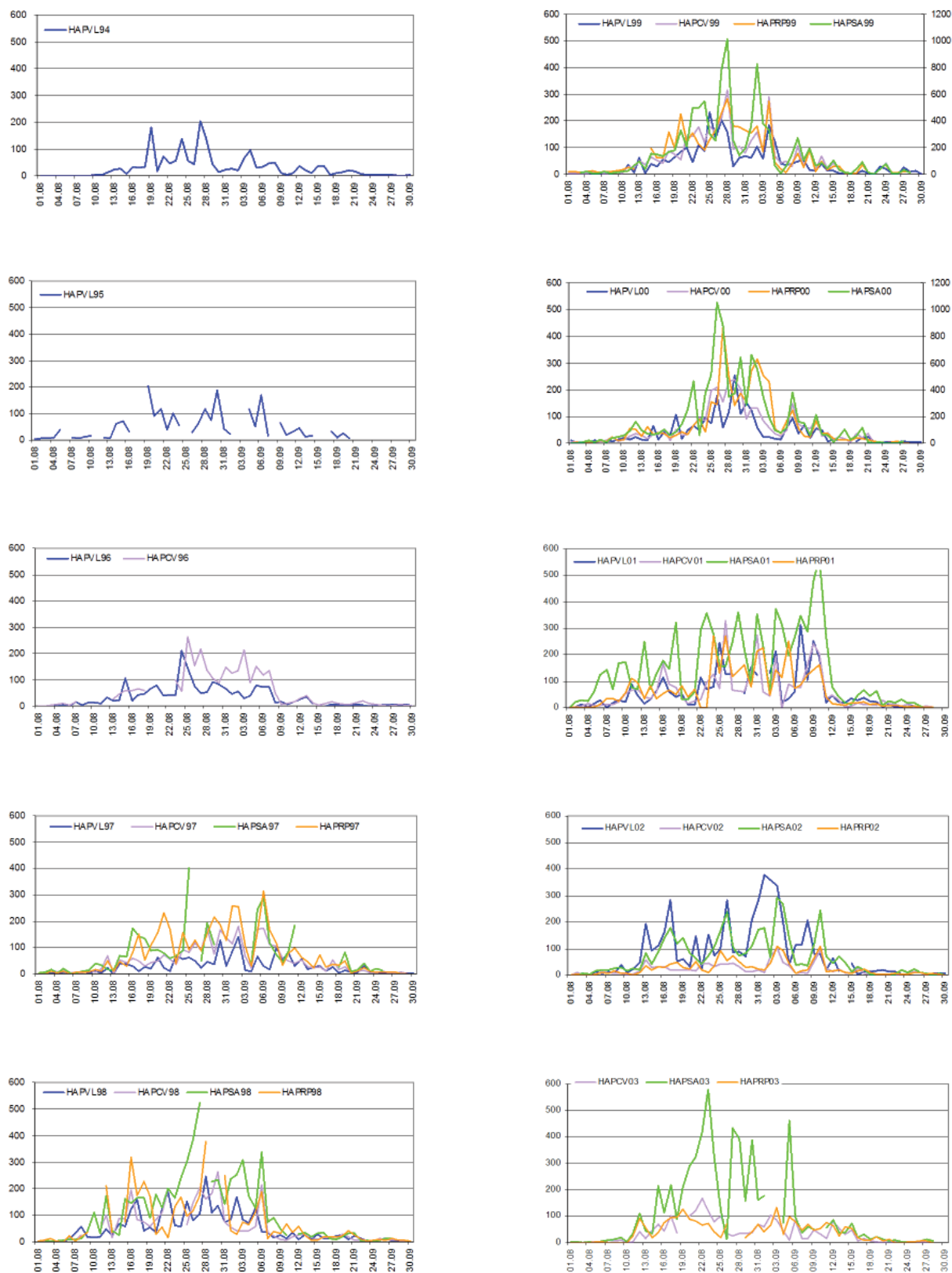


Figure 2.6 : Concentrations d'ambrosie par  $m^3$  d'air à Montréal entre 1994 et 2003. En 1999 et 2000, les concentrations de pollen à Sainte Anne de Bellevue (Ouest) sont sur l'axe de droite des graphiques

Ainsi des disparités sont notées en terme de quantité mais la question qui se pose alors est de savoir si en dépit de cela, les rythmes de station en station sont les mêmes au cours d'une même année. Dans ce sens, le Tableau A2.3-11 présente les résultats de l'analyse de corrélation temporelle réalisée chaque année entre les stations. Nous utilisons le coefficient de corrélation de rang de Spearman «  $r_s$  » qui indique le degré de liaison existant entre le classement des éléments selon la variable  $x$  et le classement des éléments selon la variable  $y$ . Si  $r_s = 1$  alors les classements selon  $x$  et  $y$  sont rigoureusement identiques. Si  $r_s = -1$  alors les deux classements sont rigoureusement inverses. Si  $r_s = 0$ , les deux variables sont indépendantes (Scherrer, 1984). La formule de  $r_s$  est la suivante (eq. 1) :

$$r_s = 1 - 6 \frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad \text{eq. 1}$$

Ce coefficient correspond à 1 moins la distance relative existant entre deux variables, distance mesurée en calculant la somme du carré des différences de rangs. Elle est relativisée en le divisant par ce qu'elle aurait été si les deux variables étaient indépendantes. Lorsque deux ou plusieurs éléments occupent un même rang, on leur affecte alors le rang médian de la série d'*ex aequo*. Si ces derniers sont trop nombreux, on doit alors introduire des facteurs de correction lors du calcul de  $r_s$ . La signification de  $r_s$  est testée à partir des règles de décision présentées dans le Tableau A2.3-4. Nous retenons que chaque année, la co-variation entre les sites est significative et forte avec des coefficients tous plus forts que 0.677.

## ii. Fluctuations temporelles par site

Dans un autre ordre d'idée, il est intéressant de savoir comment un site de mesure se comporte d'année en année (Figure A2.3-1). Il importe de distinguer plus précisément l'impact des conditions météorologiques de l'été et probablement aussi du printemps. Nous avons effectué à cet égard des tests non paramétriques pour échantillons indépendants dont les résultats figurent dans le Tableau A2.3-13 afin de voir comment se comporte la courbe pollinique en un site d'année en année. Nous remarquons que 3 sites sur 4 révèlent des différences hautement significatives d'année en année ( $\alpha = 0.01$ ). La station ouest montre quant à elle, certes des différences significatives mais pas aussi marquées qu'ailleurs. Nous imaginons que du fait qu'elle se trouve au cœur d'une source d'ambrosie, certes les quantités de pollen fluctuent d'année en année au gré de la quantité de plants qui se développent mais ces variations demeurent moins fortes qu'ailleurs. Nous émettons l'hypothèse que l'emplacement du site est potentiellement déterminant de ce type de résultat.

La co-variation inter annuelle est ensuite analysée. Les résultats figurent dans le Tableau A2.3-14. On peut identifier que le plus fort taux de corrélations significatives se situe à Ville Lasalle avec 80.5% des cas et à l'Ouest avec près de 70% des cas. Inversement plus on va vers l'Est et plus cette proportion diminue, passant de 50% au Centre Ville à près de 45% à l'Est. Il est aussi possible de remarquer que deux années se démarquent plus spécifiquement, à savoir : 1999 à l'Ouest et à l'Est comme étant l'année la moins bien corrélée avec le plus grand nombre d'années et 2001 à Ville Lasalle et au Centre Ville présentant dans ces deux stations les mêmes critères que précédemment.

Des tests de comparaisons multiples permettent de mettre à jour des années particulièrement différentes des autres et dont les impacts sont plus marqués en un site ou en un autre. Les résultats se trouvent dans le Tableau A2.3-15. Ce ne sont pas systématiquement les mêmes années qui se différencient des autres. A l'Ouest, l'année 2001 est significativement différente des autres et plus particulièrement des deux années durant lesquelles les concentrations étaient généralement faibles, c'est-à-dire 1997 pour cause de données manquantes et 2002. 2001 est une année particulièrement abondante dans l'Ouest. A Ville Lasalle, le résultat apparaît plus compliqué avec les deux années 1994 et 1995. Un certain nombre de données sont manquantes en 1995 et 1994 est une année de plutôt faible pollinisation dans cette station comparativement à d'autres années telles 1998, 2001 et 2002. Au Centre Ville et dans l'Est une année ressort plus spécifiquement qui est 2002.

Les mêmes tests ont par la suite été de nouveau effectués mais en ne considérant cette fois que la période commune aux 4 stations de manière à éliminer une partie du « bruit », c'est-à-dire de 1997 à 2002. Les résultats Figurent dans le Tableau A2.3-16. On retrouve ici l'organisation préalablement mise en évidence avec la paire de stations « CV/Est ». Dans ces deux sites, l'année 2002 est systématiquement différente de toutes les autres. En ce qui concerne la station Ouest et celle de Ville Lasalle, il y a aussi des recoupements mais un peu moins évidents. Dans les deux cas ici aussi, l'année 2002 est significativement différente d'un certain nombre d'autres années. A l'Ouest, rappelons que les années 1999 à 2001 sont trois années très fortement polliniques avec des totaux annuels dépassant les 8 500 grains par  $m^3$ . 2001 est une année spéciale du point de vue de son déroulement dans le temps, de son allure globale complètement « hachée ». Elle compte à l'Ouest parmi les 3 années les plus polliniques, son pic maximum complètement déplacé en fin de saison est le 4<sup>ième</sup> plus important de la série de 7 années disponibles. A VL, 1997 à l'inverse de 2002, est l'année la plus faiblement pollinique.

Afin de compléter cette description d'ordre général quant

à l'allure des 10 saisons polliniques étudiées, remarquons à la Figure 2.7a la tendance à la hausse des concentrations totales mesurées dans l'Ouest et à VL alors qu'elles sont nettement à la baisse dans l'Est et plus ou moins à la baisse également au CV (du fait de l'année 2002).

### iii. Synthèse préliminaire

Bien que l'ensemble des 4 sites à l'étude co-varient d'année en année, la distribution des concentrations d'ambrosie mesurée chaque année en ces sites est significativement différente au cours d'une même année d'un site à l'autre et d'une année à l'autre au sein d'un même site. Toutefois certains comportements de site en site ou d'année en année sont semblables ou très proches. Il semble que chaque site ait une spécificité plus ou moins marquée. Si nous abordons la question des sites, alors nous notons que 2 à 3 entités apparaissent.

La première est caractérisée par la station Ouest. A cette station, les comptes totaux de même que les maxima atteints sont toujours les plus importants mis à part une entorse en 2002. En moyenne, ils sont grossièrement trois fois plus importants qu'ailleurs. D'une année sur l'autre, cette station connaît certes des fluctuations de ces valeurs et du rythme de sa saison mais dans l'ensemble une relative régularité est observée. En terme d'allure de courbe, l'année 1999 est plus différente des autres suivie de 2001 et en terme de comptes, 2002 est étrange. Cette année-là, les comptes tombent en effet de moitié. En 2001, année fortement pollinique, nous remarquons que même si la saison a débuté relativement tôt, les maxima se sont fait ressentir plus tardivement qu'habituellement (entre le 09 et le 12 septembre à cette station). Cette entité Ouest est particulière, entre autre probablement du fait de sa localisation. Cette station (photo 1) est située en zone agricole au cœur ou à proximité d'une source majeure d'ambrosie aux confins occidentaux de l'île de Montréal. Ce fait explique probablement les quantités mesurées. Il n'est pas surprenant de voir que cette station réagit extrêmement rapidement à une décharge de pollen dans l'air du fait de sa grande proximité de l'abondance. Remarquons aussi que du point de vue des concentrations totales saisonnières mesurées dans cette station, elles sont à la hausse, alors que les maxima tendent eux, à diminuer après deux années particulièrement élevées en 1999 et 2000. L'année 2002, quant à elle, demeure très spéciale. Nous formulons l'hypothèse qu'elle a soit connu des conditions de printemps très défavorables à l'ambrosie, lors de son développement et que de ce fait, la plante a poussé en quantité moindre par rapport à d'habitude, ou alors que les conditions au cours de la saison de pollinisation étaient telles qu'elles n'ont pas permis soit la libération du pollen ou plutôt sa mise en suspension dans l'air du fait de conditions fortement humides, pluvieuses ou encore de conditions de vent défavorables.

La seconde entité correspond à la station Ville Lasalle qui présente quelques particularités elle aussi. Elle est la station qui enregistre les comptes les plus faibles en moyenne mais est en revanche en très régulière augmentation par palier depuis 1994 jusqu'à l'année 2002 qui fait de cette station, celle où les comptes furent de façon surprenante les plus abondants de l'ensemble des sites. En l'espace de 9 ans, cette station a vu ses concentrations totales saisonnières passer du simple à plus du triple et les maxima quasiment doubler. L'année 2001 est l'année qui ici est la moins en phase avec les autres années tout comme au Centre Ville. Nous avons déjà noté à l'Ouest le fait que le maximum de la saison s'est alors produit très tardivement, succédant à une série de pics d'importance moindre mais non négligeable. Ainsi, au lieu de connaître un pic majeur et quelques pics en dessous des 200 grains m<sup>-3</sup> d'air, cette station a expérimenté 4 pics plus forts que cette valeur. Deux questions se posent *a priori* à propos de cette station. Elle est localisée dans un quartier du SSO de l'île de Montréal entre le Saint Laurent et le Canal Lachine, dans une zone résidentielle à proximité de zones vertes. La première question est de savoir d'où vient ce pollen d'ambrosie mesuré de manière toujours plus abondante d'année en année ? Provient-il d'une source locale qui tend à se développer du fait par exemple du développement de chantiers autoroutiers ou de bordures de rivière non ou mal entretenus ? Ville Lasalle est incontestablement un nœud autoroutier qui pourrait bien favoriser le développement de nouvelles sources de production d'ambrosie. La seconde question toujours relative à ces quantités mesurées, est liée à la circulation atmosphérique. On peut avancer l'hypothèse que le régime de vent favorise d'année en année l'apport de plus en plus massif de pollen au-dessus de cette région et qu'au cours de l'année 2002, une conjonction de phénomènes extraordinaires ait joué pour générer les résultats que nous connaissons. On peut aussi imaginer que les vents habituellement du sud voire de l'ouest étaient plus régulièrement de l'est transportant des quantités importantes de pollen de la rive Sud. Etant donné la proximité de Ville Lasalle de la Rive Sud à cet endroit plus resserré du Saint Laurent, on peut concevoir que les conditions thermiques du fleuve aient aussi pu favoriser le passage du pollen de la rive Sud vers ce site plus particulièrement. Seule l'analyse du régime des vents cette année-là ainsi que des autres conditions météorologiques nous permettra de confirmer ou non cette hypothèse. Ce qui peut nous permettre de croire à cette hypothèse est que le pic majeur cette année-là a lieu avec 3-4 jours d'avance sur l'Ouest qui la plupart du temps est la première station à en faire l'expérimentation du fait de la proximité des sources. Nous avons pu de source sûre obtenir l'information qu'apparemment il n'y avait pas eu de chantiers autoroutiers nouveaux en 2002 et que par ailleurs le gazon du bord de l'autoroute A20, propriété du ministère des transports, étaient régulièrement entretenus (Beaumont, J.-P., *com. perso.*, 18.04.05). Etant donné



que le pic majeur en 2002 s'est étendu sur une période de 3 à 4 jours, nous pouvons aussi envisager une situation de blocage mais d'envergure limitée dans l'espace. Le pic dans les trois autres stations a lieu en phase lorsque celui de Ville Lasalle cède.

La troisième entité se compose en fait des deux derniers sites, celui du Centre Ville et celui de l'Est de l'île. Ces deux stations se comportent en effet de manière assez semblable. La station de l'Est fait preuve de concentrations légèrement plus élevées en moyenne mais co-varie tout à fait bien avec celle du Centre-ville d'année en année. Les pics polliniques sont d'un ordre de grandeur assez semblable également. En termes d'allure, les courbes du Centre Ville et celles de Ville Lasalle ne sont pas si différentes même si en revanche les quantités globales le sont. Le Centre Ville compte toujours plus de pollen qu'à Ville Lasalle, environ 1000 grains par année à part en 1998 et 2001 années durant lesquelles les comptes globaux sont quasi identiques et 2002 qui inverse totalement la tendance. La station Est est localisée dans un quartier de Rivière des Prairies - Pointe aux Trembles situé vraiment à l'extrémité Est de l'île à peu de distance à vol d'oiseau de la Rivière des Prairies, dans une zone urbaine de type mixte caractérisée par des zones résidentielles relativement dispersées, des zones industrielles et des parcs en bordure de rivière notamment. Cette zone est tout à fait propice au développement de l'ambrosie ce qui explique très certainement les comptes quelques peu plus importants à cette station qu'au Centre Ville. Cette différence était d'ailleurs plus marquée au début de notre série de données qu'à la fin. Est-ce à dire que les quantités produites dans l'Est tendent à diminuer ou que les conditions atmosphériques printanières ou estivales sont récemment moins favorables à l'ambrosie ? Il est en effet important de noter la tendance manifeste à la baisse, tant des comptes totaux saisonniers que des maxima. Au Centre Ville, en revanche, la situation est plutôt plus ou moins stable mise à part la chute brutale des concentrations en 2002. La station Centre Ville est localisée en aval des pentes du Mont Royal dans une zone fortement urbanisée, coincée entre la colline et le Saint Laurent. On peut remarquer que suivant les années et suivant les moments de la saison, le Centre Ville est en phase en termes de rythme avec l'Ouest ou avec l'Est. Nous émettons l'hypothèse que ce type d'observation est directement le fruit de la provenance du vent dominant. A ce site, l'année 2001 comme à Ville Lasalle est l'année durant laquelle les corrélations sont les moins significatives avec les autres années alors que dans l'Est c'est l'année 1999 qui est en cause comme dans l'Ouest. Pour conclure cette section, nous pouvons dire que 1997 et 1998 sont probablement en dépit des données manquantes, des années d'envergure semblable, que 1999 très pollinique, peut être la plus « normale » de toutes, tend à s'achever assez tard en septembre. Les corrélations entre stations sont d'ailleurs les plus fortes, cette année-

là (Tableau A2.3-11). 2000 est une des années fortement polliniques avec un comportement assez proche de celui de l'année 1999 à la différence près que le pic maximum est atteint un peu plus tôt. 2001 se caractérise par une succession inhabituelle de pics de moyenne envergure ayant démarré fortement et relativement tôt en août. Elle est probablement caractérisée par une succession de conditions plus ou moins favorables à la dispersion du pollen. Ce qui caractérise également cette année est la pente ascendante des concentrations plus on avance dans la saison pour finir brutalement entre les 12 et 15 septembre. Ainsi, la succession des années 1998 à 2001 semble avoir été plutôt favorable à la pollinisation de l'ambrosie. C'est au cours de ces 4 années que les comptes polliniques totaux sont les plus importants notamment dans les 3 stations que sont celles de l'Ouest, de l'Est et du Centre Ville avec toutefois un paroxysme en 2000 dans l'Ouest et à l'Est pour ce qui est du maximum mesuré mais pas des quantités totales qui sont plus abondantes en 1999 tout comme au Centre Ville avec ici aussi cette fois, le maximum atteint. 2002 est quant à elle une année particulière, caractérisée par un renversement de situation du point de vue des comptes polliniques. La station Ville Lasalle voit ses comptes saisonniers augmenter de manière significative à l'inverse des autres stations qui enregistrent un creux. 2003 semble être une année de reprise assez marquée dans l'Ouest, un peu moins au Centre Ville et dans l'Est.

## 2.2. Extrêmes et risques associés

Une saison pollinique se décrit par le biais des chiffres qui la caractérisent soit les concentrations quotidiennes. Mais il est aussi possible de traduire ces valeurs sous d'autres formes qui se veulent plus « explicatives », plus « descriptives ». Allant dans ce sens, il nous a intéressé de savoir comment se distribuaient les valeurs quotidiennes d'année en année et de station en station. Trois points retiennent particulièrement notre attention. Le premier concerne les valeurs extrêmes. Afin de voir comment, d'année en année ou de site en site, ces valeurs se distribuent et quelle est la tendance au cours des 10 dernières années du nombre de jours « extrêmes », nous avons travaillé avec le 90<sup>ième</sup> percentile et plus. Nous avons à cet égard déterminé, par année à partir du cumul de l'ensemble des données disponibles, les différentes valeurs correspondantes aux percentiles 90, 95 et 99 de ces échantillons annuels. Le second concerne les valeurs au-delà desquelles le risque d'allergie est potentiellement existant. Nous avons employé à cet égard l'échelle de risque utilisée par la Ville de Montréal pour prévenir la population. Dans ce cas, nous souhaitons voir comment se comporte le risque de déclenchement d'allergie en différents points de l'île et s'il existe notamment une tendance à l'augmentation de celui-ci au cours de la dernière décennie.



i. Evolution spatio-temporelle des valeurs extrêmes

La question qui se pose est de savoir comment ont évolué les valeurs extrêmes au cours des 10 dernières années à Montréal ? Observe-t-on une tendance particulière qui pourrait laisser présumer d'une évolution spécifique des quantités maximales de pollen d'ambroisie dans le temps dans la grande région de Montréal ?

Les valeurs de percentile 25, 50, 75, 90, 95 et 99 ont été calculées pour chaque année en confondant toutes les données de toutes les stations puis pour chaque année et par station, le nombre de jours se situant au-delà de ces valeurs de percentiles a été déterminé (Tableaux 2.1 et 2.2). La lecture de ces deux tableaux laisse clairement apparaître une similitude de comportement d'année en année sur une base « régionale » ; similitude non surprenante puisque liée à la définition même du percentile.

Dans le Tableau 2.2, qui présente la fréquence relative en pourcentage du nombre de jours observés par station et par année au-delà d'une valeur donnée de percentile annuelle, des disparités apparaissent entre les sites. Ainsi, le site Ouest présente régulièrement 2.3 à 5.2% des jours de la saison pollinique au-delà du percentile 99 saisonnier. Les autres stations ne présentent en revanche aucun jour dans cette classe de percentile.

Seule l'année 2002 se présente comme une exception avec aucune journée à l'Ouest mais 3.3% des jours à Ville Lasalle. En 1994, 1995 et 1996, années pour lesquelles nous ne disposons pas de toutes les données et notamment pas de celles de l'Ouest ni de celles de l'Est, nous remarquons que 3.3 à 2.4% des journées à VL et 3.8% au CV se situent au-delà du percentile 99. Ces résultats bien qu'intéressants ne sont pas comparables avec les autres années. L'absence de la station Ouest de ces comptes induit une valeur de percentile 99 annuelle beaucoup plus faible qu'autrement. Nous trouvons également dans le Tableau 2.2 les valeurs des fréquences moyennes obtenues pendant la période commune aux quatre stations soit 1997-2002.

Un test de comparaison pour k échantillons indépendants (test de Kruskal-Wallis) a été effectué sur ces 4 échantillons en tenant compte des classes de percentiles afin de voir si la distribution annuelle et moyenne des journées se situant au-delà de valeurs données de percentiles annuels variait significativement d'un site de mesure à l'autre. Il s'avère que ce n'est pas le cas (Tableau A2.3-34) dans le cas de la moyenne. En dépit de l'apparente différence de comportement entre l'Ouest, voire même l'Est et les autres, ces différences ne sont en moyenne pas significatives. Toutefois, il existe bien des différences significatives ou qui tendent à l'être entre

stations pour une classe de percentile donnée comme c'est le cas des classes de percentiles entre 90 et 95 % et entre 50 et 75% (Tableau A2.3-32). Ces différences sont d'autant plus marquées vers les valeurs extrêmes c'est-à-dire au-delà du percentile 99 comme vers les valeurs les plus faibles comprises dans la classe des valeurs minimales. Si une station telle que la station Ouest présente le plus grand nombre de valeurs extrêmes « vers le haut » c'est aussi elle qui présente le plus petit nombre de journées de valeurs « vers le bas ».

Toutes stations confondues	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Nb j > 99%	2	1	2	1	2	2	3	2	2	2
95% > Nb j ≥ 99%	2	2	3	11	9	9	10	11	13	7
90% > Nb j ≥ 95%	3	1	7	11	12	13	10	11	9	7
75% > Nb j ≥ 90%	11	6	17	33	35	34	37	34	38	24
50% > Nb j ≥ 75%	13	12	27	57	58	58	56	59	59	37
25% > Nb j ≥ 50%	19	9	28	57	59	55	62	56	63	40
Nb j ≤ 25%	11	10	28	55	57	58	58	61	59	38
Total	61	41	112	225	232	229	236	234	243	155

a)

Toutes stations confondues	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Nb j > 99%	3.3	2.4	1.8	0.4	0.9	0.9	1.3	0.9	0.8	1.3
95% > Nb j ≥ 99%	3.3	4.9	2.7	4.9	3.9	3.9	4.2	4.7	5.3	4.5
90% > Nb j ≥ 95%	4.9	2.4	6.3	4.9	5.2	5.7	4.2	4.7	3.7	4.5
75% > Nb j ≥ 90%	18.0	14.6	15.2	14.7	15.1	14.8	15.7	14.5	15.6	15.5
50% > Nb j ≥ 75%	21.3	29.3	24.1	25.3	25.0	25.3	23.7	25.2	24.3	23.9
25% > Nb j ≥ 50%	31.1	22.0	25.0	25.3	25.4	24.0	26.3	23.9	25.9	25.8
Nb j ≤ 25%	18.0	24.4	25.0	24.4	24.6	25.3	24.6	26.1	24.3	24.5
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

b)

Tableau 2.1 : Distribution du nombre de jours (haut) et de la fréquence relative (bas) du nombre de jours par année, toutes stations confondues, comptés au-delà d'une certaine valeur de percentile saisonnier

Il est intéressant de savoir que la distribution de la courbe saisonnière d'ambroisie est à peu près semblable d'année en année à Montréal à l'échelle de la région, toutefois il est aussi important d'étudier le comportement d'année en année des valeurs de ces percentiles extrêmes à l'échelle régionale (Figure 2.8) de même qu'à celle des sites (Figure 2.9). A cet égard la Figure 2.8 présente graphiquement l'évolution dans le temps de ces valeurs de percentiles régionaux et saisonniers en grains/m<sup>3</sup> d'air. Il apparaît que l'année 1999 marque l'apogée d'une succession de 5 années au cours desquelles la valeur du percentile 99 est fortement croissante. Nuançons ce propos en rappelant que de 1994 à 1996, les stations Ouest et Est sont absentes des comptes polliniques.

%OUEST / AN	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moy94-03	Moy97-02
Nb j > 99%				2.3	3.4	3.5	5.2	3.4	0	4.2	3.1	3.1
95% < Nb j ≤ 99%				9.1	6.8	14	15.5	15.3	6.6	14.6	11.7	11.7
90% < Nb j ≤ 95%				2.3	8.5	8.8	3.4	8.5	11.5	12.5	7.9	7.9
75% < Nb j ≤ 90%				22.7	20.3	15.8	22.4	18.6	24.6	12.5	19.6	19.6
50% < Nb j ≤ 75%				25	20.3	21.1	25.9	25.4	23	12.5	21.9	21.9
25% < Nb j ≤ 50%				27.3	15.3	22.8	8.6	18.6	16.4	29.2	19.7	19.7
Nb j ≤ 25%				11.4	25.4	14	19	10.2	18	14.6	16.1	16.1
Total				100	100	100	100	100	100	100	100	100
%VL / AN	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moy94-03	Moy97-02
Nb j > 99%	3.3	2.4	0	0	0	0	0	0	3.3		1	0.6
95% < Nb j ≤ 99%	3.3	4.9	1.7	0	1.7	0	0	1.8	11.7		2.8	2.5
90% < Nb j ≤ 95%	4.9	2.4	1.7	0	1.7	3.3	1.7	3.5	6.7		2.9	2.8
75% < Nb j ≤ 90%	18	14.6	16.7	8.2	15	8.2	13.3	12.3	21.7		14.2	13.1
50% < Nb j ≤ 75%	21.3	29.3	30	26.2	30	29.5	21.7	22.8	13.3		24.9	23.9
25% < Nb j ≤ 50%	31.1	22	21.7	31.1	31.7	23	35	33.3	21.7		27.8	29.3
Nb j ≤ 25%	18	24.4	28.3	34.4	20	36.1	28.3	26.3	21.7		26.4	27.8
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100		100	100
%CV / AN	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moy94-03	Moy97-02
Nb j > 99%			3.8	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0
95% < Nb j ≤ 99%			5.8	1.7	1.8	1.8	0	1.7	0	0	1.6	1
90% < Nb j ≤ 95%			9.6	6.7	7	3.6	3.4	1.7	0	1.7	4.2	3.4
75% < Nb j ≤ 90%			13.5	13.3	8.8	16.1	15.3	11.9	6.6	15.5	12.6	12.5
50% < Nb j ≤ 75%			17.3	28.3	26.3	32.1	25.4	27.1	31.1	20.7	26.1	27.3
25% < Nb j ≤ 50%			28.8	25	28.1	19.6	28.8	23.7	31.1	27.6	26.6	26.3
Nb j ≤ 25%			21.2	25	28.1	26.8	27.1	33.9	31.1	34.5	28.5	29.5
Total			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
%EST / AN	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moy94-03	Moy97-02
Nb j > 99%				0	0	0	0	0	0	0	0	0
95% < Nb j ≤ 99%				10	5.4	0	1.7	0	0	0	2.4	2.4
90% < Nb j ≤ 95%				10	3.6	7.3	8.5	5.1	0	0	4.9	4.9
75% < Nb j ≤ 90%				16.7	16.1	20	11.9	15.3	9.8	18.4	15.4	15.4
50% < Nb j ≤ 75%				21.7	23.2	18.2	22	25.4	29.5	38.8	25.5	25.5
25% < Nb j ≤ 50%				18.3	26.8	30.9	32.2	20.3	34.4	20.4	26.2	26.2
Nb j ≤ 25%				23.3	25	23.6	23.7	33.9	26.2	22.4	25.5	25.5
Total				100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 2.2 : Distribution de la fréquence du nombre de jours par année et par station comptés au-delà d'une certaine valeur de percentile saisonnier

L'année 2000 montre également des valeurs extrêmes très fortes mais un peu moindres que 1999. L'année 2001 marque quant à elle le retour à des valeurs de percentiles 99 plus « normales » qui tendent à augmenter de nouveau jusqu'en 2003. Il semble que nous pouvons conclure à une tendance globalement croissante au cours des 10 dernières années des valeurs extrêmes. Nous nous demandons maintenant si ces résultats demeurent les mêmes si les stations sont étudiées au cas par cas.

La station Ville Lasalle (Figure 2.9b) laisse globalement apparaître des valeurs beaucoup plus faibles mais en constante hausse au cours des 9 années disponibles.

A la différence de toutes les autres stations qui voient leurs valeurs chuter en 2002, celle-ci expérimente les plus fortes valeurs de la période disponible, valeurs de niveau semblable à celles obtenues dans l'Ouest la même année.

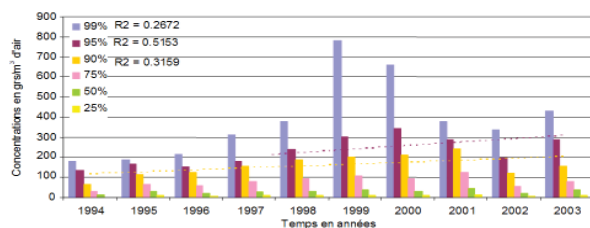
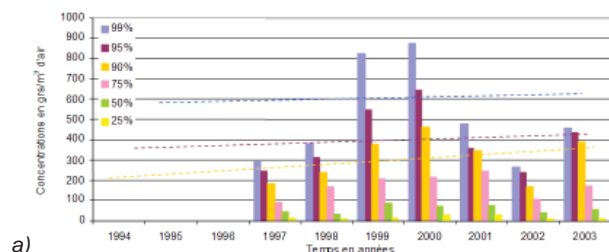
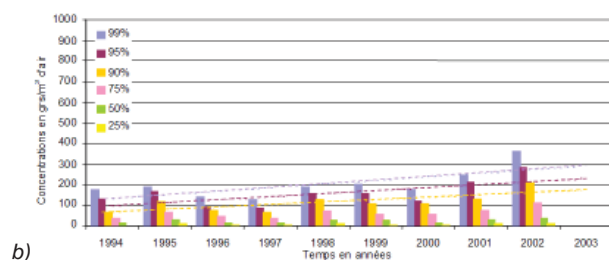


Figure 2.8 : Evolution de la valeur des percentiles régionaux et saisonniers dans le temps

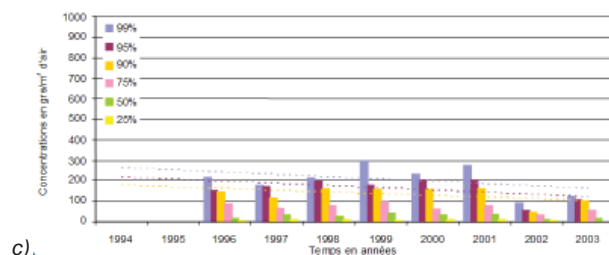
Au Centre Ville (Figure 2.9c), l'allure des valeurs de percentiles extrêmes est beaucoup plus stable que partout ailleurs et présente même une très légère tendance à la baisse avec le temps. Ici aussi l'année 1999 a été une année extrême pour cette station avec la plus forte valeur de percentile 99 enregistrée (près de 300 grains  $m^{-3}$  d'air). De même l'amplitude entre le percentile 95 et le percentile 99 y est relativement plus forte par rapport aux autres années. Si l'on ne se fie en effet qu'à la valeur de percentile 95 alors elle est quasiment chaque année la même entre 150 et 200 grains. Il existe aussi par ailleurs une très forte constance et similitude de comportement avec la station de l'Est, à propos du 90<sup>ème</sup> percentile. Ces valeurs sont à quelques grains près les mêmes et suivent exactement la même tendance d'une station à l'autre. Cela signifie que dans les deux cas et d'année en année 90% des données se situent entre 0 et 120 grains en moyenne.



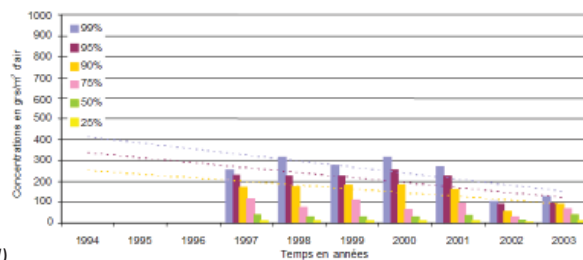
a)



b)



c)



d)

Figure 2.9 : Evolution de la valeur des percentiles saisonniers dans le temps à l'Ouest (a), à VL (b), au CV (c) et à l'Est (d)

Enfin les valeurs extrêmes à l'Est (Figure 2.9d) bien qu'un peu plus fortes qu'au CV ou à VL, demeurent bien en deçà de celles de l'Ouest. La tendance est globalement à la baisse et les rythmes plutôt différents de ceux de l'Ouest. C'est en 1998 et 2000 que les valeurs extrêmes y sont les plus fortes (plus de 310 grains  $m^{-3}$  d'air).

Ces résultats vont dans le même sens que les observations faites précédemment à partir des données brutes. A l'échelle de la région, la saison de la pollinisation de l'ambrosie à Montréal suit la même distribution. Ainsi, peu importe les conditions atmosphériques du printemps qui influencent les quantités et peu importe celles du moment qui génèrent des disparités au jour le jour, sur une base régionale et saisonnière, il existe une relative similitude en moyenne en terme de distribution du nombre de jours au-delà d'une certaine valeur de percentile annuel donné. En revanche, pris au cas par cas, les sites de mesure se comportent très différemment les uns des autres. Le site le plus pollinique est évidemment celui qui présente le plus grand nombre de jours par an de valeurs extrêmes. Ensuite, l'année 2002 est une année véritablement «exceptionnelle» dans le sens qu'elle est complètement à l'inverse des autres années en général. Ensuite, nous remarquons que l'année 1998 apporte à l'Est ses plus fortes valeurs, que l'année 1999 apporte les plus fortes valeurs dans l'Ouest et au Centre ville de même que dans une certaine mesure à Ville Lasalle et finalement que 2000 qui correspond à l'apogée dans l'Ouest des valeurs extrêmes, l'est aussi dans une certaine mesure dans l'Est. Nous remarquons donc qu'outre le fait que ces valeurs sont très différentes d'un site à l'autre, notamment entre l'Ouest et les trois autres sites, elles le sont aussi d'une année à l'autre en un même site, résultat potentiel de conditions printanières particulières qui modulent les quantités de pollen disponibles mais aussi et enfin, entre les sites eux-mêmes, résultat possible de conditions estivales de micro échelle au jour le jour. Ces résultats sont intéressants si l'on peut d'une quelconque manière les associer à une notion de risque d'allergie. En effet, traiter la question du pollen de l'ambrosie nous amène sans conteste à devoir aborder cette question des risques ; à savoir, établir une relation avec la santé de la population.

## ii. Evolution spatio-temporelle du risque

Cette question est abordée en se basant sur l'échelle employée par la Ville de Montréal durant la saison de l'ambrosie (Tableau 2.3). Il s'agit une échelle fixe dans le temps et l'objectif est de voir comment se comporte la distribution du nombre de jours pour chaque niveau de risque d'année en année et de site en site.

Le nombre de jours de risque 0 à 4 par site et par année (Tableau 2.4), de même que par année tous sites confondus (Tableau 2.5) et finalement par site toutes années confondues (Tableau 2.6) a été calculé. Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été employé pour comparer les échantillons indépendants (*i.e.* k sites une même année) et celui de Friedman dans le cas des échantillons dépendants (*i.e.* k années au même site). Il s'avère que dans ce cas là, aucun des tests statistiques n'a révélé de disparités entre les échantillons. L'hypothèse nulle d'unicité de la population d'origine n'a jamais été rejetée. Nous concluons donc que la distribution des journées de R0 à R4 à Montréal, que ce soit de site en site ou d'année en année demeure toujours sensiblement la même. Ceci est peut être le résultat de valeurs de classe trop élevées. En effet, à titre d'exemple, la valeur de 300 grains/m<sup>3</sup> d'air et plus correspond en fait à 70% des valeurs extrêmes au-delà du percentile 99 et à 20% de celles du percentile 95.

La Figure 2.10 donne un aperçu de la représentation graphique intéressante de la distribution de la fréquence d'occurrence régionale et annuelle des différentes classes de risque. Il est intéressant de noter qu'à part pour les deux classes extrêmes (R0 et R4) la distribution semble assez régulière d'année en année. Ce qui signifie que d'année en année, lorsque l'on considère la région en cumulant l'ensemble des données disponibles, on trouve environ 35% des jours de classe R1, à peu près autant de classe R2 et entre 15 et 20% de classe R3.

Risque	Caractérisation du risque	Concentrations impliquées
R0	Nul	[AMB] < 3 grains/m <sup>3</sup> d'air
R1	Faible	3 ≤ [AMB] < 25 grains/m <sup>3</sup> d'air
R2	Modéré	25 ≤ [AMB] < 99 grains/m <sup>3</sup> d'air
R3	Élevé	99 ≤ [AMB] < 299 grains/m <sup>3</sup> d'air
R4	Fort	[AMB] ≥ 300 grains/m <sup>3</sup> d'air

Tableau 2.3 : Echelle de risque allergique telle qu'employée par le service de la Ville de Montréal

La classe de risque nulle compte pour +/- 10% du temps et celle de risque fort pour +/- 3% du temps. Concernant

la classe R4, remarquons qu'elle fait son apparition en 1997 seulement, première année durant laquelle les données de l'Ouest et de l'Est sont disponibles. C'est pourquoi, il importe de savoir comment se distribuent ces classes de risque d'un site à l'autre. La Figure 2.11 en donne en aperçu.

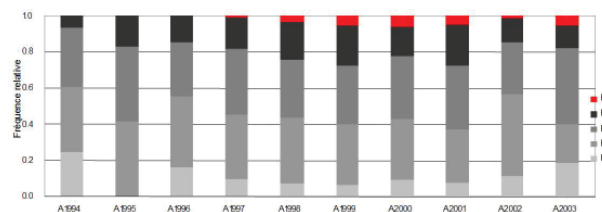


Figure 2.10 : Représentation graphique de la distribution de fréquence relative annuelle et régionale des différentes classes de risques

Notons que la plus grande part du temps caractérisée par R4 (Figure 2.11a) a essentiellement lieu dans l'Ouest, éventuellement dans l'Est et exceptionnellement à VL récemment. La station VL est probablement la station en laquelle les conditions de pollen ont le plus évolué au cours de la dernière décennie. Nous constatons en effet une tendance à l'augmentation des valeurs de risque avec le temps. Inversement le nombre de jours R0 décroît d'année en année, passant de 25% du temps en 1994 à 5% en 2002 au profit de journées de risque R1. Le risque R2 caractérisé par un taux d'environ 30 à 32% du temps est certainement le plus stable des 5 niveaux de risque. Remarquons également une tendance assez manifeste à l'augmentation des jours de risque R3, élevé. Il semble donc que l'on puisse signaler à partir de ces quelques résultats que ce site de VL bien que peu à risque au début des années 1990, l'est devenu en quelques années et risque de voir la situation s'aggraver dans le futur si la tendance demeure la même.

Les autres stations ne montrent pas de tendance aussi marquée. Il existe cependant une légère tendance à l'augmentation du risque fort et nul dans l'Ouest. Cette observation est également valable au CV et dans l'Est. Le risque nul correspond à des concentrations inférieures à 3 grains/m<sup>3</sup> d'air. Il s'agit donc de journées très peu polliniques qui sont, soit caractéristiques de débuts ou de fins de saison, soit le résultat du mauvais temps. Nous pouvons imaginer qu'à long terme, la saison pollinique puisse démarrer plus lentement ou finir moins brutalement. Elle pourrait potentiellement avoir tendance à s'allonger favorisant la floraison progressive de l'ambrosie et expliquant les faibles quantités dans l'air sur une plus longue période. Ces faibles quantités peuvent aussi provenir de sites plus éloignés et plus précoces et dont le pollen aurait voyagé. Nous ne pouvons qu'émettre cette hypothèse d'allongement éventuel de la saison, car comme nous l'avons déjà précisé en début de chapitre, une série d'à peine 10 années ne nous permet pas de détecter pareille information de manière certaine. Ce que



nous pouvons aussi nous demander est, pourquoi si en trois points bien distincts de l'île, la saison de l'ambrosie s'allonge, ne le ferait-elle pas aussi à VL ? Une réponse possible pourrait être le développement d'un nouveau foyer majeur d'ambrosie à proximité de la station VL qui masquerait ce phénomène.

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moyenne94-03	Moyenne97-02
R0	24.6	0	16.1	9.8	6.9	6.1	9.3	7.3	11.1	18.7	11	8.4
R1	36.1	41.5	39.3	35.8	37.1	34.1	33.9	29.9	45.3	21.3	35.4	36
R2	32.8	41.5	30.4	36.4	31.5	32.3	34.7	35	29.2	41.9	34.6	33.2
R3	6.6	17.1	14.3	17.3	21.6	22.3	16.1	23.1	13.2	12.9	16.4	18.9
R4	0	0	0	0.9	3	5.2	5.9	4.7	1.2	5.2	2.6	3.5
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 2.5 : Distribution par année de la fréquence d'occurrence des jours à risques 0 à 4 toutes stations disponibles confondus

L'Ouest est le seul point à expérimenter des journées de risque 4, parfois comme en 2000 jusqu'à plus de 20% du temps. La fréquence de ces journées de risque très élevé est d'ailleurs assez fortement à la hausse sur la période à l'étude. Les autres stations n'en font l'expérience qu'assez rarement. A VL, l'année 2002 montre 5% des journées dans cette catégorie. En 2001, quelques journées de R4 ont aussi été ressenties à VL et au CV mais en très faible proportion comparativement aux 15% du temps dans l'Ouest. L'Est n'a pas été affectée de la même manière cette année-là. Enfin si le nombre de jours de risque nul ainsi que celui de risque majeur augmente, ou tout au moins, leur part respective sur la saison globale dans l'Ouest, on peut alors envisager une tendance à passer de plus en plus souvent d'une situation de faible risque à une situation fortement polluée, résultant en une augmentation de la variabilité. Ces situations extrêmes pourraient être de plus en plus souvent marquées à l'avenir. Enfin, les sites CV et Est voient la situation des allergiques nettement s'améliorer tout au moins au cours de la dernière décennie. La tendance à la hausse du risque nul a déjà été relevée comme dans le cas de l'Ouest mais à la différence de l'Ouest, les risques les plus élevés R3 et R4 sont nettement là à la baisse. Soit les conditions atmosphériques de ces dernières années n'ont pas favorisé l'apport massif de pollen d'ambrosie sur ces deux sites, soit les sources de proximité ont vu leur nombre diminuer et donc une amélioration générale de l'environnement se manifeste. On retrouve ici des observations antérieures tendant à montrer que la situation s'aggrave dans l'Ouest au profit de l'Est et du Centre Ville.

	OUEST97-03	VL94-02	CV96-03	EST97-03
R0	5.2	12.3	13.6	8.2
R1	25.6	40.3	34.8	38.4
R2	31.3	33.4	35.9	34.4
R3	25.9	13.2	15.2	17.8
R4	11.9	0.8	0.4	1.2
Total	100	100	100	100

Tableau 2.6 : Distribution par station de la fréquence d'occurrence des jours à risques 0 à 4 toutes années disponibles confondus

Finalement la Figure 2.12a présente la part de risque global de la décennie à l'étude expliquée par année et montre que globalement chaque année apporte un « lot » équivalent de journées caractérisées par des concentrations polliniques correspondant aux risques R1 à R3. Il existe certes de légères fluctuations entre années mais globalement on voit que chaque année contribue de manière assez régulière pour chacune de ces classes. Il existe une plus grande variabilité en ce qui a trait aux classes extrêmes R0 et R4. La Figure 2.12b quant à elle montre la part de la contribution moyenne de chaque station à chaque niveau de risque pendant la décennie étudiée. On note évidemment la part prépondérante de la station Ouest pour ce qui est du risque 4. La seconde contribution relativement importante mais bien moindre est celle de l'Est, d'environ 10% de la part de l'Ouest. On peut aussi voir que le risque nul est représenté à part égale par les stations VL et CV et moindrement par l'Est et l'Ouest qui sont toutes les deux stations les plus polliniques. On retrouve ensuite l'observation faite préalablement, à savoir que les risques intermédiaires sont à peu de chose près représentés équitablement sur les 4 sites à la nuance près que le risque R3 est encore légèrement plus représenté par la station Ouest. Au regard des observations faites, on peut éventuellement s'attendre à ce que la part de représentation de VL augmente dans cette catégorie à l'avenir.

Pour conclure cette section sur les risques et leur distribution dans le temps et entre les sites de mesure, on peut dire qu'en dépit du fait qu'il n'existe pas de différences statistiquement significatives entre les sites, les années, il a été possible de mettre plusieurs aspects intéressants à jour. Il est ainsi possible de confirmer que l'Ouest demeure toujours plus pollinique alors que l'Est voit globalement sa situation s'améliorer dans le temps. En termes de risque pour la population, il a été noté que le seuil clinique se situe dès que l'on atteint 3 à 5 grains/m<sup>3</sup> d'air pour les individus les plus sensibles, ce qui correspond au R1. De ce point de vue là, la situation est réellement critique sur l'île de Montréal de manière globale. Le seul aspect potentiellement favorable est le fait que dans l'Est ainsi qu'au CV, la classe de risque R0 tend à augmenter, or cette augmentation se fait au dépend des journées de plus forts risques. Ces variations observées de site en site et d'année en année peuvent être le fait de la conjonction de plusieurs phénomènes dont entre autre, les conditions atmosphériques que nous allons désormais analyser.



QWEST	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moyenne94-03	Moyenne97-02
R0				2.3	1.7	1.8	8.6	5.1	8.2	8.3	5.1	1.7
R1				34.1	33.9	26.3	15.5	15.3	32.8	22.9	25.8	33.9
R2				40.9	25.4	26.3	34.5	32.2	32.8	29.2	31.6	25.4
R3				20.5	30.5	26.3	20.7	32.2	26.2	22.9	25.6	30.5
R4				2.3	8.5	19.3	20.7	15.3	0	16.7	11.8	8.5
Total				100	100	100	100	100	100	100	100	100

VL	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moyenne94-03	Moyenne97-02
R0	24.6	0	20	16.4	13.3	13.1	6.7	7	5		11.8	10.3
R1	36.1	41.5	38.3	44.3	33.3	36.1	55	36.8	41.7		40.3	41.2
R2	32.8	41.5	36.7	34.4	35	36.1	26.7	33.3	26.7		33.7	32
R3	6.6	17.1	5	4.9	18.3	14.8	11.7	21.1	21.7		13.4	15.4
R4	0	0	0	0	0	0	0	1.8	5		0.8	1.1
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100		100	100

CV	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moyenne94-03	Moyenne97-02
R0			11.5	10	8.8	7.1	13.6	8.5	21.3	27.6	13.5	11.5
R1			40.4	33.3	40.4	32.1	27.1	33.9	49.2	22.4	34.9	36
R2			23.1	40	33.3	37.5	44.1	42.4	27.9	37.9	35.8	37.5
R3			25	16.7	17.5	21.4	15.3	13.6	1.6	12.1	15.4	14.3
R4			0	0	0	1.8	0	1.7	0	0	0.4	0.6
Total			100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

EST	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moyenne94-03	Moyenne97-02
R0				8.3	3.6	1.8	8.5	8.5	9.8	21.1	8.8	6.8
R1				30	41.1	41.8	37.3	33.9	57.4	24.6	38	40.2
R2				31.7	32.1	29.1	33.9	32.2	29.5	50.9	34.2	31.4
R3				28.3	19.6	27.3	16.9	25.4	3.3	3.5	17.6	20.2
R4				1.7	3.6	0	3.4	0	0	0	1.2	1.4
Total				100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tableau 2.4 : Distribution par station et par année de la fréquence d'occurrence des jours à risques 0 à 4

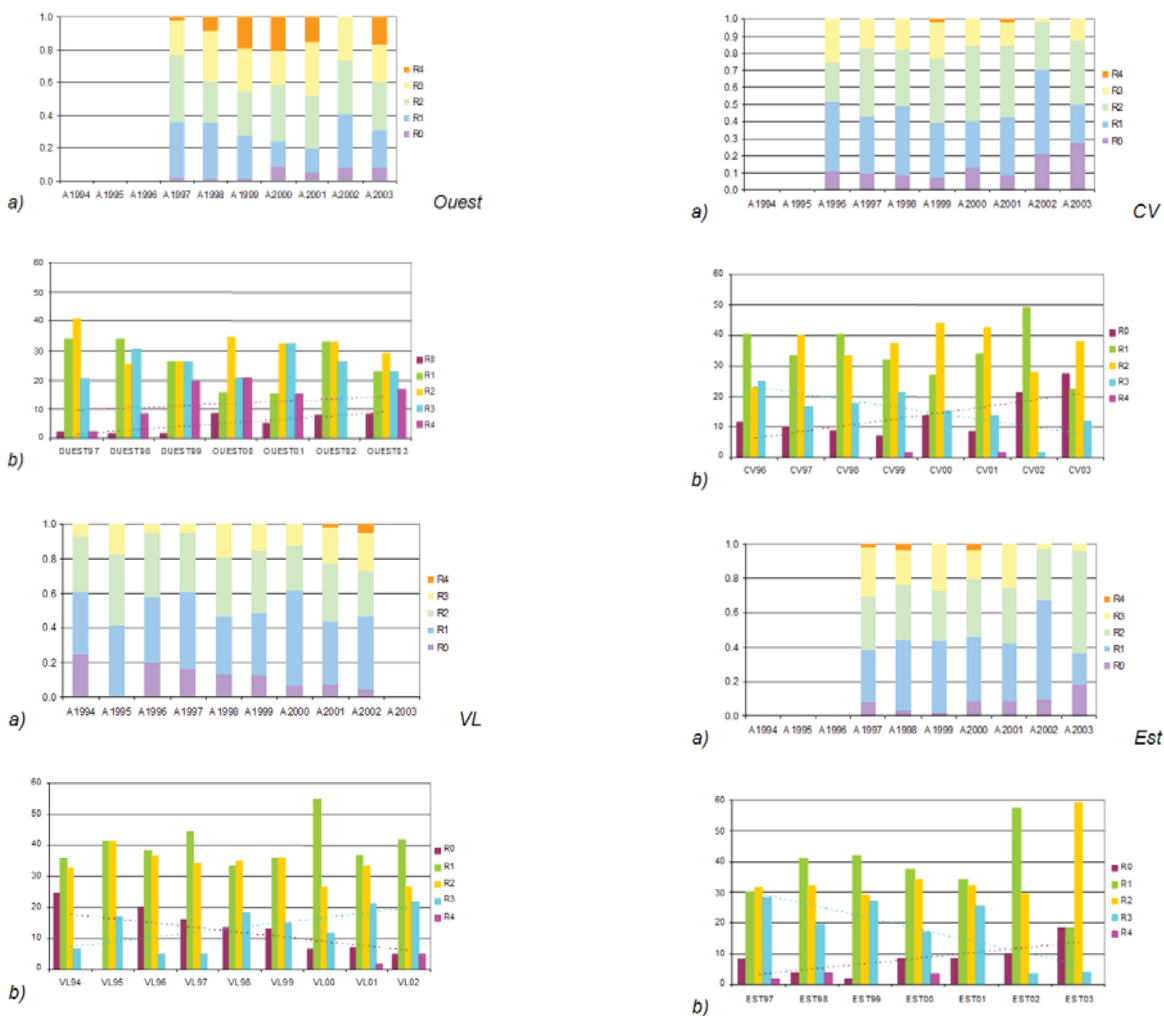


Figure 2.11 : Représentation graphique de la distribution de fréquence relative annuelle par site des différentes classes de risques (a) et évolution en fonction du temps de la distribution des classes de risques par station (b)

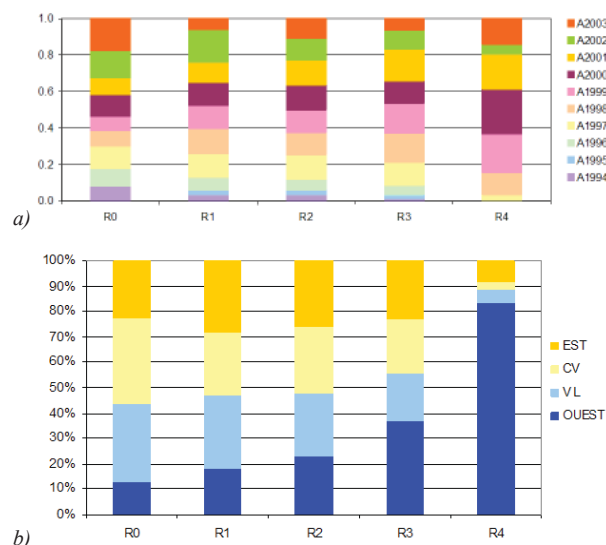


Figure 2.12: Distribution de fréquence régionale relative de a) chaque année pour chaque classe de risque et de b) chaque station pour chaque classe de risque

### 3. Evolution du temps à Montréal entre 1994 et 2003

Au-delà des tendances saisonnières ou quotidiennes moyennes des concentrations, de nombreuses fluctuations observables résultent des conditions atmosphériques qui peuvent profondément affecter tant les quantités émises par les plantes que la part de celles-ci effectivement transportée et à quelle distance (Fischbach, 1983). Il est donc important, dans la mesure où nous souhaitons comparer le comportement du pollen de l'ambrosie au cours d'une même année, en un ou plusieurs sites d'un espace géographique comparable, de nous informer des conditions météorologiques prévalentes durant la saison pollinique. Dans le cas où maintenant nous désirons mettre en valeur des différences interannuelles, relatives notamment aux fluctuations de la durée de la saison pollinique ou de la charge pollinique, il est important d'accorder une importance aux conditions printanières. Il est en effet connu que si les variations quotidiennes du pollen d'ambrosie pour une station donnée et pour une année donnée sont le résultat de conditions météorologiques récentes, ce n'est pas le cas des variations interannuelles qui, elles, sont le fruit de conditions climatiques printanières (Raynor et Hayes, 1970 ; Buck et Levetin, 1982 ; Fishbach, 1986).

Afin de rendre compte des conditions qui ont précédé les étés qui retiennent notre attention, et afin également d'être en mesure de caractériser les saisons polliniques qui en ont découlé, le comportement d'un certain nombre de paramètres météorologiques au cours des mois d'avril, mai et juin pour le printemps et des mois de juillet, août et septembre en ce qui concerne l'été

a été étudié. Toutefois, avant d'entrer dans l'analyse détaillée des données disponibles à l'échelle de Montréal et en guise d'introduction à cette section sur les aspects climatiques, il a été jugé utile de présenter en Annexe 2.4 un survol des conditions climatiques nationales et régionales connues au cours des années 1997 à 2003 au Canada et plus précisément dans l'Est du pays. Des rapports détaillés sont disponibles sur le site internet d'Environnement Canada<sup>5</sup>. Retenons de cette analyse, la description suivante des conditions annuelles du temps dans la région Grands Lacs/Saint Laurent:

1994 : tendance humide marquée, année et printemps frais, été chaud. 3<sup>ème</sup> été le plus humide (+27%) de la période 1948-2004

1995 : tendance humide et chaude marquée. 5<sup>ème</sup> été le plus chaud (+1.4°C)

1996 : tendance humide marquée, année et printemps frais, été chaud. 7<sup>ème</sup> printemps le plus froid (-1.1°C)

1997 : tendance sèche marquée, année et printemps frais et été proche de la normale. 4<sup>ème</sup> printemps le plus froid (-1.6°C), été normal

1998 : tendance chaude marquée, année et été secs et printemps humide. 1<sup>er</sup> printemps le plus chaud (+2.8°C)

1999 : tendance sèche et chaude marquée. 7<sup>ème</sup> printemps le plus chaud (+1°C), 3<sup>ème</sup> printemps le plus sec (-26.8%), 6<sup>ème</sup> été le plus chaud (+1.3°C)

2000 : tendance humide marquée, année et printemps chauds et été frais. 5<sup>ème</sup> printemps le plus chaud (+2°C), 10<sup>ème</sup> printemps le plus humide (+21.1%) et 9<sup>ème</sup> été le plus humide (+16.4%)

2001 : tendance sèche et chaude marquée. 9<sup>ème</sup> printemps le plus sec (-18.4%) et 2<sup>ème</sup> été le plus sec (-26.8%)

2002 : printemps frais et humide, été sec et chaud. 5<sup>ème</sup> printemps le plus humide (+33.6%) et 9<sup>ème</sup> été le plus sec (-15.4%)

2003 : printemps frais et humide, été sec et chaud. 10<sup>ème</sup> printemps le plus froid (-0.8°C)

#### 3.1. Analyse des conditions météorologiques

##### i. Conditions thermiques

###### ✓ Température

L'analyse des températures maximales, minimales et moyennes des mois d'avril, mai et juin prises séparément

ainsi que de tous les printemps pris dans leur globalité, permet de mettre à jour le fait que les printemps 1998 et 1999 sont les plus chauds de la période à l'étude. Ainsi les températures maximales d'avril et mai sont particulièrement fortes en 1998. En avril elles dépassent de 2.8°C la moyenne de la période. En mai, il est question de 4.3°C. Ce n'est pas le cas en revanche en juin de cette même année. Toujours en 1998, les températures minimales d'avril et mai sont aussi bien supérieures aux moyennes respectives de chacun des mois (2°C en avril et 3.5°C en mai). De telles valeurs d'avril et mai en font le printemps le plus chaud de la décennie. Cette année est suivie de près par 1999 qui elle, en plus de présenter des conditions de début de printemps somme toute assez chaudes bien que légèrement moindres que 1998, offre des températures de juin particulièrement chaudes tant en ce qui concerne les valeurs de Tmax en juin toutefois équitables à d'autres années telles que 1995, 1997, 2001 et 2003 avec respectivement 26.4, 26.1, 25.4 et 24.2°C que les valeurs de Tmin de 1.7°C plus chaudes que la moyenne de la période.

Concernant les printemps les plus froids, il est plus difficile de voir apparaître une année en particulier. On peut dire que 1997 et 2002 et jusqu'à un certain point 1996 et 2000, furent des printemps plus frais. En 1997, les Tmax sont plutôt dans la moyenne en avril et mai et plutôt chaudes en juin alors que les Tmin furent particulièrement froides en avril et mai contrairement à juin. Le mois de juin fut plus « normal » voir assez chaud durant le jour puisque leur moyenne atteint tout de même les 26.1°C. Ainsi le printemps 1997 est caractérisé par avril et mai relativement frais et juin plutôt chaud. En 2002, les conditions ne se présentent pas tout à fait de la même façon. Le mois d'avril se présente plus tempéré qu'en 1997, celui de mai est comparable mais juin est en revanche plus frais. Quant à 1996 et 2000, les deux printemps tournent autour des moyennes de saison.

Le Tableau A2.3-22 et la Figure 2.13 fournissent un récapitulatif des données ainsi que de leur représentation graphique. Que ce soit en avril ou mai et encore plus en juin, les moyennes obtenues durant la décennie à l'étude sont plus élevées que les normales climatiques de la période 1971-2000, laissant présumer d'un réchauffement global au cours de cette période. Considérant maintenant avril, 1998, 1999 suivies de 2001 et 2002 furent les plus chauds de la décennie, à l'inverse de 1995, 2000 et 2003 qui furent les plus froids. Mai offre les mêmes conditions de chaleur pour 1998 et 1999 ainsi que 2001 mais ce n'est plus le cas de 2002 qui se retrouve au rang des mois de mai les plus frais précédé seulement par l'année 1997. Juin est marqué par une courbe de la température sinusoïdale signifiant qu'une année sur deux les températures sont plus fraîches. Nous pouvons toutefois identifier de nouveau 1999 comme mois de juin le plus chaud et 2000 comme étant le plus frais. En conclusion il est possible

de dire que la fin des années 90 et le début des années 2000 a été marqué par 3 printemps particulièrement chauds alors que tous les autres se situent plus ou moins dans la moyenne. Restera à vérifier si les années 1998, 1999 et 2001 furent des années polliniques spéciales. Elles comptent en effet parmi les plus polliniques (total régional cumulé).

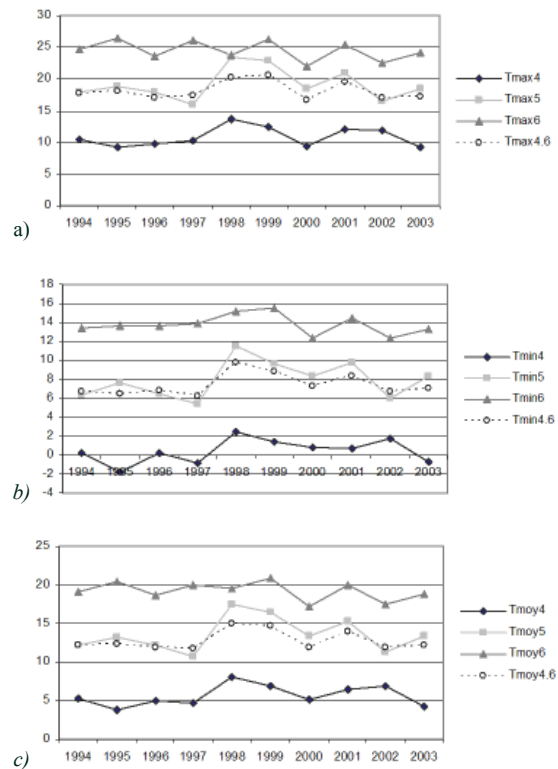


Figure 2.13 : Distribution saisonnière de Tmax, Tmin et Tmoy durant les printemps 1994 à 2003

L'analyse des températures (Tableau A2.3-23) de juillet, août et septembre révèle que dans tous les cas les moyennes mensuelles de chacun des mois ou des étés pris dans leur globalité sont supérieures aux valeurs normales correspondantes de la période 1971-2000 (Figure 2.14). Le mois de juillet le plus chaud est sans conteste celui de l'année 1999 avec une Tmax moyenne supérieure de 1.2°C à la normale de saison ainsi que pour renforcer cet effet une valeur de Tmin moyenne également supérieure de 2.2°C de la normale. Ces deux valeurs sont également supérieures à la moyenne de la période à l'étude de 1.3 et 1.5°C respectivement. La moyenne globale de juillet est quasi égale à la normale de saison alors que la Tmin moyenne est quant à elle bien plus élevée que la normale. En août, c'est l'année 2001 qui est la plus chaude de la décennie en moyenne et ceci du fait d'une valeur de Tmax très élevée, soit de 2.7°C plus forte que la moyenne de la décennie et 3.8°C de plus que la normale. On peut dire que c'est une valeur extrême pour la période à l'étude. En revanche, la température minimale d'août la plus forte est

obtenue en 2003 avec une valeur de 17°C soit 1.9°C de plus que la moyenne et 2.8°C de plus que la normale. En septembre, c'est l'année 2002 qui bat les records de Tmax avec une valeur de 2.8°C plus élevée que la moyenne et 4.5°C de plus que la normale. La Tmin la plus forte en septembre est mesurée en 1999 (2.3°C de plus que la moyenne et 3.9°C de plus que la normale).

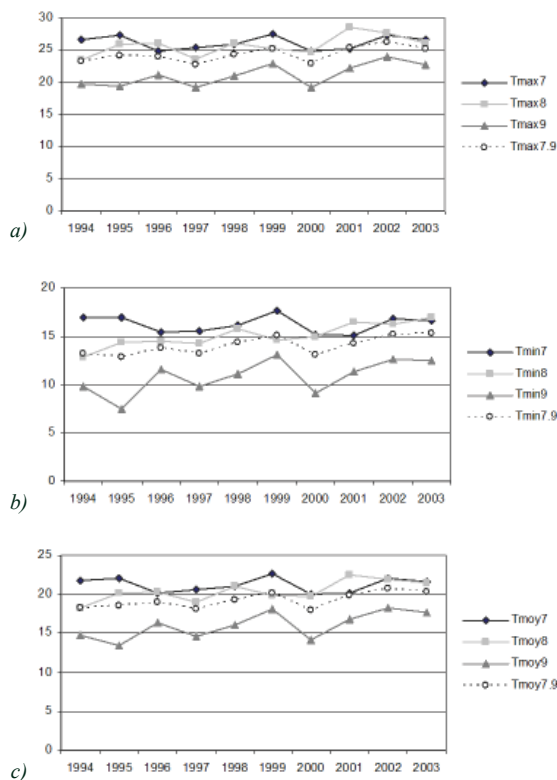


Figure 2.14 : Distribution saisonnière de Tmax, Tmin et Tmoy durant les étés 1994 à 2003

Nous avons globalement des années qui, avec le temps, deviennent de plus en plus chaudes. Les printemps les plus chauds de la période à l'étude sont 1999 et 1998 alors que les étés les plus chauds tendent à être à compter de l'année 1999 et en oubliant 2000, toutes les années 2000 avec un pic en 2002. Notons enfin que la tendance à la hausse de températures en général est plus marquée en été qu'au printemps.

✓ Degrés jours de croissance (> 5°C)

A l'analyse des températures, succède celle des degrés jours de croissance au-dessus de 5°C. Ces valeurs sont d'un intérêt particulier pour la croissance des plantes. A Montréal, le seuil de pollinisation d'ambrosie se situe autour de 1287.5 plus ou moins 56.6 degrés jours de croissance accumulés. Ce qui signifie qu'une fois que la fourchette des 1230.9 à 1344.1°C (1287.5 +/- 56.6°C) a été atteinte on peut s'attendre à trouver du pollen d'ambrosie dans l'air de Montréal, la plante ayant atteint sa maturité. *A priori* plus le printemps est froid,

plus l'accumulation des degrés jours de croissance est ralentie, donc plus les premiers pollens risquent de tarder à apparaître et *vice et versa*.

Remarquons dans un premier temps au Tableau A2.3-25 que durant la période 1989-2003, 4 printemps se distinguent entièrement des autres par l'amplitude des degrés jours de croissance accumulés au cours de la saison. Ils se trouvent bien au-delà de la normale de la saison mais aussi de la moyenne. Il s'agit des printemps 1998 (924.3°C), 1999 (881°C), 2001 (838.2°C) et 1991 (829.8°C). Deux autres années sont également chaudes mais plus proches toutefois de la normale de saison. Il s'agit de 1989 (744.9°C) et 2003 (737.4°C). Nous pouvons noter préalablement que les années 1998, 1999, 2001 et potentiellement 2003, sont des années fortement polliniques. Nous savons également que l'année 1991 fut particulièrement pollinique à Montréal aussi (Goyette-Pernot *et al.*, 2002). Nous pouvons donc nous poser la question de savoir à quel point les conditions thermiques du printemps sont déterminantes des quantités de pollen recueillies à la fin de l'été ? Tous les printemps chauds donnent-ils systématiquement naissance à des saisons polliniques d'ambrosie abondantes ? L'autre fait intéressant à noter est que 4 des 6 années ci-dessus mentionnées ont toutes eu lieu au cours des 6 dernières années de cette période de 15 ans. Cela semble confirmer la tendance au réchauffement récent.

La Figure 2.15 représente l'évolution des degrés jours de croissance supérieurs à 5°C mensuels entre le 1<sup>er</sup> avril et le 30 septembre 1989 à 2003 à Montréal. La tendance est bien à la hausse et ce, quelque soit le mois de l'année considéré. Elle est plus marquée au cours des années les plus récentes. Les saisons globales de la fin des années 1990 et du début des années 2000, mis à part l'année 2000 elles-mêmes, sont manifestement des années plus chaudes. Par ailleurs, remarquons dans les Tableaux A2.3-24 et A2.3-26, que la normale climatique est très souvent dépassée par la moyenne de la période à l'étude, ce qui est bien signe d'une tendance au réchauffement récent. Au Tableau A2.3-25, la lecture de la ligne «fin juillet» nous permet de dire qu'au sein de notre échantillon d'années, seules 5 années sur les 10 sont prêtes à voir fleurir l'ambrosie dès la fin juillet. Il s'agit de 1995, 1998, 1999, 2001 et 2003. Parmi ces 5 années, quatre comptent parmi les plus chauds printemps précédemment cités. En toute logique, ce sont en effet les printemps les plus chauds qui présentent l'accumulation la plus importante de degrés jours de croissance supérieurs à 5°C, comme c'est le cas des années 1998 avec 2248.5°C accumulés au 30 septembre et 1999 avec 2281.7°C. Elles sont suivies de près par 2001, 2003 et finalement 2002 à la faveur de son été chaud.

Si nous comparons maintenant le début réel de la saison pollinique à chacune des stations de mesure (Figure 2.15)

et ce résultat extrait du Tableau A2.3-24, nous pouvons remarquer que toutes les stations n'obéissent pas à la même règle. En ordonnée se trouve la date (jour julien) du début de la saison pollinique.

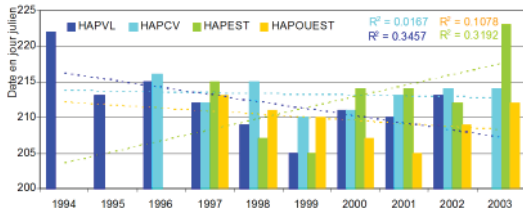


Figure 2.15: Evolution de la date de début de saison pollinique d'année en année aux quatre stations

A l'Est, seule la précocité des années 1998 et 1999 est vraiment très marquée. Ce n'est pas le cas de 2001 et 2003. A VL on retrouve aussi cette précocité marquée en 1995, 1998 et 1999 et relativement en 2001. Dans l'Ouest, la situation est différente. Dans l'ensemble cette station est régulièrement un peu plus précocité que les autres si bien que la précocité observée ailleurs est moins significative ici à part en 2001 où elle est particulièrement marquée. Au CV enfin, cette station est inversement toujours en moyenne un peu plus tardive que les autres et même si l'année 1999 est en effet plus précocité que les autres, elle connaît de façon générale moins de fluctuations importantes. Elle a un comportement plus homogène de ce point de vue là en ce qui concerne l'évolution du début de la saison dans le temps. Il semble donc que nous ayons deux stations qui répondent assez promptement à ces variations thermiques alors que deux autres sont un peu moins influencées sur une base régulière mais probablement pour des raisons différentes (proximité de la source dans un cas et éloignement de celle-ci dans l'autre). Il n'en demeure pas moins qu'apparemment les degrés jours de croissance jouent un rôle significatif sur le début de la saison pollinique.

Est-il possible de corréler précocité et quantités polliniques totales ? Il existe une corrélation négative significative  $r_s = -0.437$  au seuil  $\alpha = 0.05$  entre l'ensemble des données saisonnières disponibles pour la région de Montréal et les dates en jour julien correspondant au début de chaque saison (Figure 2.16). On en déduit que plus la saison commence tôt, plus les chances de mesurer de grandes quantités de pollen sont grandes. Cette observation n'est pas vérifiée avec la même force aux stations considérées individuellement mais des tendances sont en revanche visibles au CV ( $r_s = -0.635$ ), à VL ( $r_s = -0.494$ ) et dans l'Ouest ( $r_s = -0.607$ ) alors que ce n'est pas le cas dans l'Est ( $r_s = -0.018$ ).

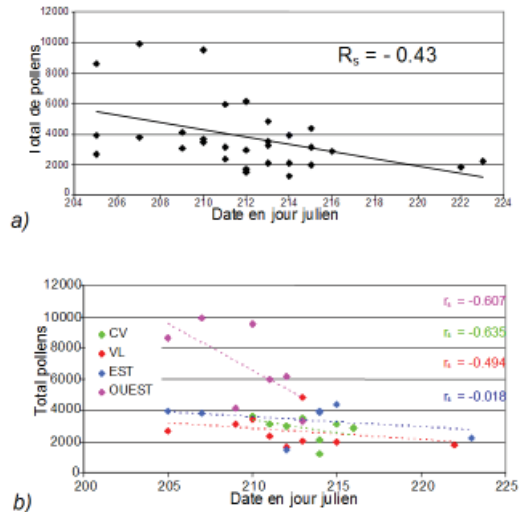


Figure 2.16: Corrélations a) entre l'ensemble des concentrations polliniques totales mesurées sur l'île de Montréal et les dates de début de saison en jours juliens et b) par station.

Enfin, les informations chiffrées du Tableau A2.3-26 sont présentées graphiquement à la Figure 2.18. Remarquons ainsi les 5 années qui se démarquent des 5 autres à la fin septembre. Il s'agit de 1999, 1998, 2001, 2003 et 2002. L'année 1995 qui à la fin juillet, bénéficiait d'un avantage certain en terme de chaleur accumulée, perd son avance courant septembre. En revanche l'année 2002 qui a connu un printemps plutôt frais, semble avoir comblé son retard par le biais d'un mois d'août chaud. Les années 1994, 1996, 1997 et 2000 ont été des années particulièrement fraîches. Il est donc possible de s'attendre à des saisons polliniques globalement abondantes en 1998, 1999, 2001, 2003 et 2002.

Sur la base des observations préalables (Tableau 2.6) 1998, 1999, 2000 et 2001 sont en effet des années fortement polliniques. Ce n'est pas le cas de 2002 sauf dans l'Ouest et à VL. L'année 2003 a été une année de forte production spécialement importante dans l'Ouest et moyenne dans l'Est et au CV (VL est manquante). 2000 est une année particulièrement atypique puisque les comptes y sont très forts or il s'agit pourtant de l'année la plus froide ! Elle compte certes au printemps, à l'échelle régionale, comme étant la 5<sup>ème</sup> année plus chaude des 50 dernières années avec  $2^\circ\text{C}$  d'écart sur la normale de la saison mais son été est aussi l'un des étés les plus frais avec un écart négatif de  $-0.4^\circ\text{C}$  à la normale. De ce fait et au regard des comptes polliniques obtenus notamment dans l'Ouest de l'île, nous nous demandons si bien que plutôt fraîche à Montréal même cette année-là, les comptes ne sont pas influencés non pas par les conditions locales mais plus spécialement par des plants s'étant développés plus au Sud et dont le pollen aurait voyagé. L'année 2000 a connu par ailleurs durant l'hiver 1999-2000 un très fort épisode de La Niña. Ce phénomène correspond en fait au phénomène inverse à El Niño. Il s'agit d'un refroidissement océanique



marqué avec des remontées d'eaux froides anormalement élevées le long des côtes Sud Américaines sous l'effet de ce que l'on pense être une intensification des alizés. La Niña a pour effet de réduire le cisaillement vertical des vents en altitude et entraîne ainsi une augmentation de la fréquence des ouragans dans l'Atlantique. Il s'avère que cette année-là a été marquée par un très grand nombre de tempêtes comme cela n'avait plus été le cas depuis 1996. Entre le 03 août et le 1<sup>er</sup> octobre, 5 ouragans ou tempêtes<sup>6</sup> tropicales ont eu lieu qui sont remontés à plus ou moins grande distance des côtes Est canadiennes (Alberto du 03 au 23/08 ; Florence du 10 au 17/09 ; Gordon du 14 au 18/09 ; Hélène du 15 au 25/09 et Isaac du 21/09 au 01/10). Dans la plupart des cas, les effets à terre ont été absents ou peu significatifs en terme de dégâts notamment mais cela n'empêche pas en revanche que du pollen sud américain ait pu être apporté.

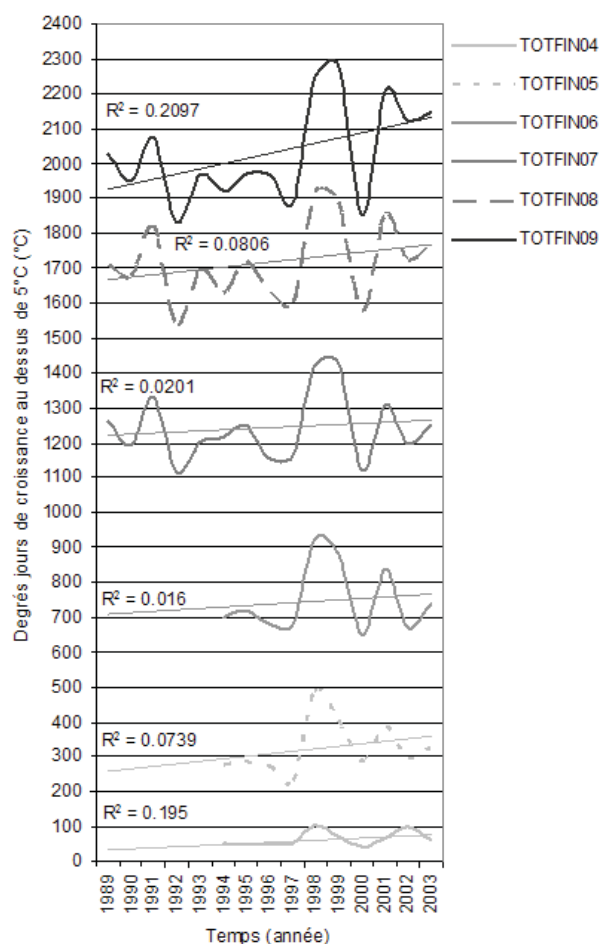


Figure 2.17 : Représentation graphique de l'accumulation mensuelle des degrés jours de croissance au-dessus de 5°C du 1<sup>er</sup> avril au 30 septembre 1989 à 2003 à Montréal

L'année 2003 quant à elle, est à l'échelle de la région Grands Lacs / Saint Laurent une année plutôt fraîche (36<sup>ième</sup> place annuelle) avec un printemps assez froid (-0.8°C par rapport à la normale) et humide et un été plus

clément se classant au 19<sup>ième</sup> rang avec un écart positif à la normale de 0.5°C et plus ou moins sec. L'année 2002 connaît quant à elle un peu le même genre de situation avec un printemps frais et humide mais moins frais et moins humide que 2003 et un été chaud et sec (plus chaud et plus sec que 2003). A l'échelle de Montréal, le printemps semble cependant avoir été plus frais en 2002 qu'en 2003 et les étés semblent s'équivaloir.

Afin de vérifier dans quelle mesure l'accumulation des degrés jours de croissance du printemps ou de l'été ou encore de la saison sont déterminants des comptes polliniques globaux mesurés, des tests de corrélation de Spearman ont été effectués entre les comptes globaux régionaux ou par station et les sommations des degrés jours de croissance supérieurs à 5°C correspondant à différents moments. Les résultats figurent dans le Tableau 2.7.

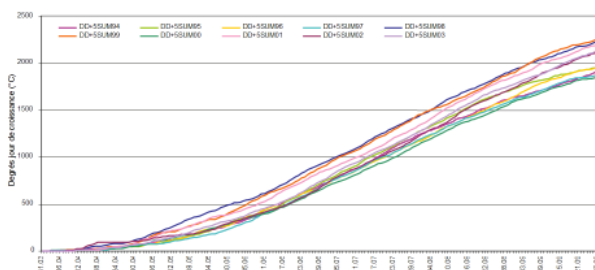


Figure 2.18 : Accumulation des degrés jours de croissance supérieurs à 5°C depuis le 1<sup>er</sup> avril jusqu'à la fin septembre de chaque année

Les années 2000 et 1997 dans une moindre mesure, sont génératrices de conditions divergentes puisque dans l'ensemble, les quantités de pollen accumulées à la fin de la saison sont bien corrélées avec l'accumulation des degrés jours. Plus la somme de ceux-ci est importante, plus les quantités de pollen sont abondantes à part en 1997 et 2000. Notre échantillon d'années étant d'assez petite taille, il demeure assez difficile de faire ressortir des relations statistiques vraiment significatives.

<i>r<sub>s</sub></i> avec année 2000	REGION MOY	REGION TOTAL	OUEST	VL	CV	EST
ACCDD5SAISON	0.503	0.24	0.143	0.667*	0.381	0.071
ACCDD5PRTPS	0.406	0.204	0	0.2	0.452	0.179
ACCDD5ETE	0.248	0.036	-0.214	0.767*	-0.333	-0.571
ACCDD5FINJUILLET	0.442	0.23	0.143	0.417	0.405	0.071
<i>r<sub>s</sub></i> sans année 2000	REGION MOY	REGION TOTAL	OUEST	VL	CV	EST
ACCDD5SAISON	0.8*	0.421*	0.829*	0.762*	0.643	0.086
ACCDD5PRTPS	0.683*	0.38	0.6	0.19	0.786*	0.257
ACCDD5ETE	0.5	0.145	0.257	0.905*	-0.321	-0.771
ACCDD5FINJUILLET	0.717*	0.408*	0.829*	0.452	0.679	0.086

Tableau 2.7 : Synthèse de résultats des tests de corrélation effectués entre les concentrations polliniques globales et les sommations de degrés jours de croissance. Les résultats marqués d'une \* sont significatifs pour  $\alpha=0.05$

6 Sommaire de la saison des cyclones tropicaux 2000 : [http://www.ns.ec.gc.ca/weather/hurricane/storm00\\_f.html](http://www.ns.ec.gc.ca/weather/hurricane/storm00_f.html) (site consulté le 02/07/05)

Deux groupes se distinguent avec d'une part, les années très fortement polliniques dont les concentrations totales saisonnières dépassent les 4 000 grains m<sup>-3</sup> d'air, associées à des printemps particulièrement chauds auxquelles se joignent les deux années un peu atypiques à savoir 2000 et 1997 et d'autre part, les années moyennes à faiblement polliniques, dont le total saisonnier est compris entre 1 500 pour les moins polliniques et 4000 grains. La Figure 2.19 présente ces corrélations par station.

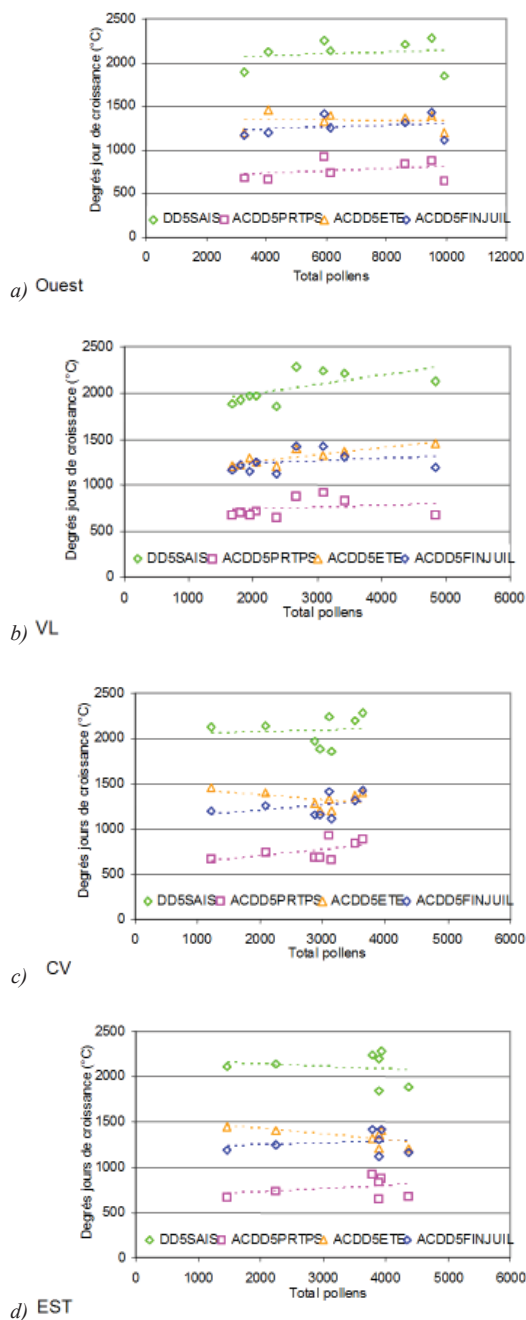


Figure 2.19 : Relation entre sommation des degrés jours de croissance pour différentes périodes telles le printemps, l'été, la fin juillet ou la saison au complet et les concentrations de pollen mesurées pendant la saison en chacun des sites

C'est à VL que les corrélations sont les plus fortes et significatives à 95% avec les degrés jours accumulés pendant la saison au complet ou pendant l'été alors qu'à l'Ouest, elles le sont avec la saison au complet et les valeurs de la fin juillet. En CV, la corrélation est bonne avec les valeurs accumulées pendant le printemps. A l'Est, en revanche, rien ne ressort.

✓ *Degrés jours de réfrigération (> 18°C)*

Les degrés jours de réfrigération correspondent aux degrés jours au-dessus de 18°C et accumulés depuis le 1<sup>er</sup> juillet de l'année en cours. Ces degrés jours fournissent une indication encore plus certaine quant à la chaleur qu'il a pu faire durant l'été. Le Tableau A2.3-27 propose le classement par ordre décroissant des années en fonction des mois et des périodes (printemps et été) ainsi que de la saison globale selon le nombre de degrés jours de refroidissement accumulés. IL est ainsi possible d'identifier les années ayant été les plus chaudes. Remarquons que durant aucun mois d'avril de cette période la température moyenne n'est passée au-dessus de 18°C. En mai en revanche, ce n'est plus le cas. Trois années se démarquent particulièrement avec 32.6°C en 1999, 26.9°C en 1998 et 21.6°C en 2001. Ce sont les trois mois de mai les plus chauds de la décennie. Comparativement à la normale pour la même période qui est de 10.5 et la moyenne de la période de 10.8, nous concluons à la dominance de mois de mai particulièrement chauds au cours de ces trois années. En juin, la normale climatique est de 42.2°C, la moyenne de 66.2. Une année est loin devant les autres, il s'agit de 1999 avec 101.6°C suivie de 1995, 1998, 2001 et 1997 qui sont toutes au-dessus de la moyenne. En juillet ensuite, 5 années sont bien au-delà de la normale et de la moyenne (1999, 2002, 1995, 1994, 2003). En août, on retrouve en tête de palmarès 2001, 2002, 2003 et 1998 et finalement en septembre, 2002, 1999, 2001, 2003 et 1996.

Finalement résumons en disant que 1999, 1998 et 2001 connaissent les printemps les plus chauds et que les étés les plus chauds sont associés aux années 1999, 2002, 2001 et 2003. Finalement, la saison est caractérisée par 5 années beaucoup plus chaudes que les autres : 1999, 2001, 2002, 2003 et 1998. La tendance au réchauffement est bel et bien nette au cours des plus récentes années.

ii. Conditions d'humidité

✓ *Humidité relative*

Observons dans un premier temps les courbes de l'humidité relative (Figure 2.20). Les Tableaux A2.3-28 à A2.3-29 proposent un classement en ordre décroissant des valeurs de l'humidité relative comparées à la moyenne de la décennie et les normales mensuelles mesurées à 06 :00 LST et 15 :00 LST. Les printemps les plus humides concernent par ordre décroissant les années 1994, 2000,

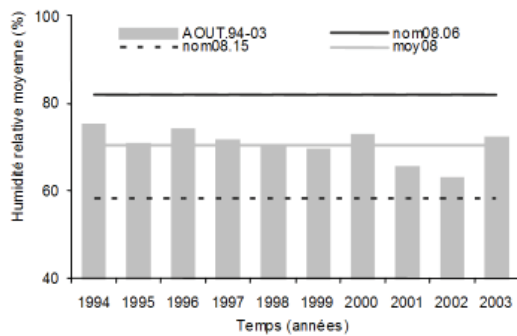
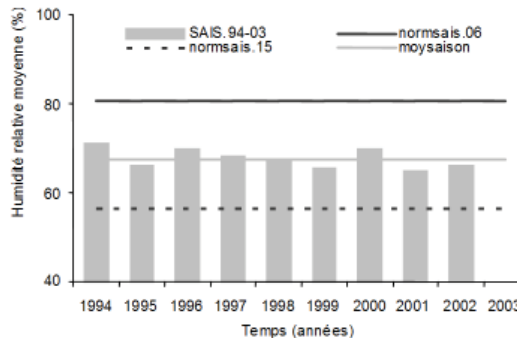
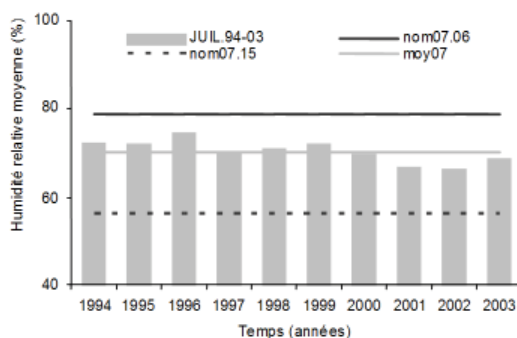
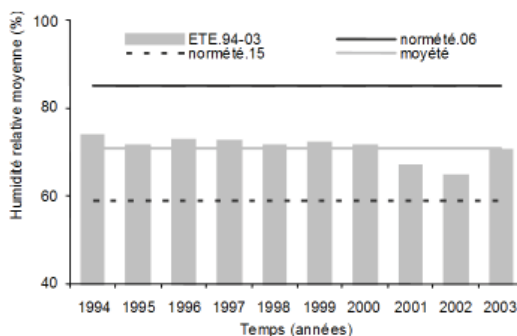
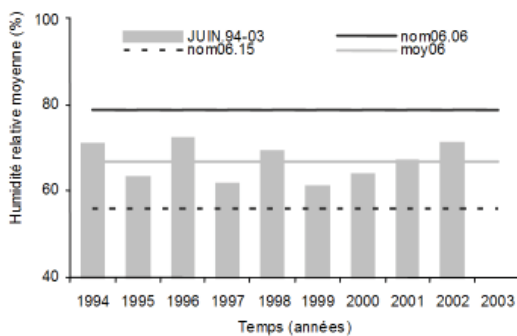
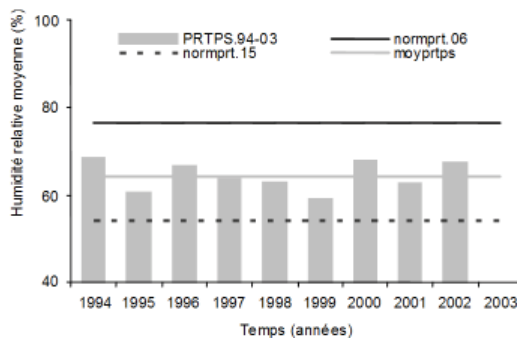
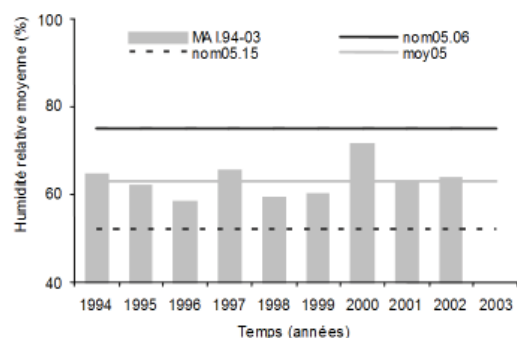
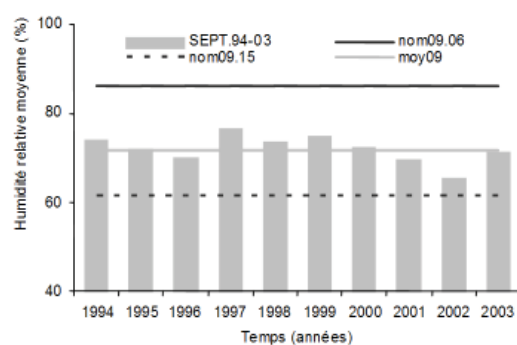
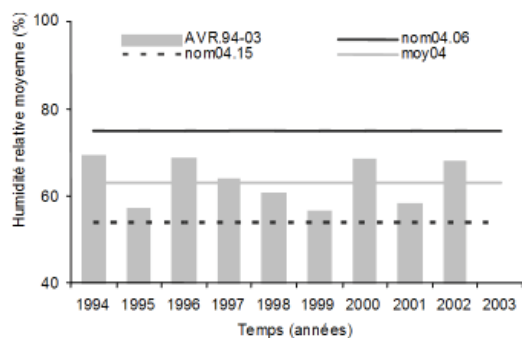


Figure 2.20 : Représentation graphique de l'humidité relative moyenne mensuelle et saisonnière entre 1994 et 2003 mesurée à l'aéroport international Pierre-Elliott Trudeau de Montréal

2002 et 1996. Les plus secs correspondent aux années 1999, 1995, 2001 et 1998. Quant aux étés, 1994, 1996, 1997 et 1999 sont plutôt très humides, contrairement à 2002, 2001 et 2003 qui furent vraiment plus secs. Si l'on regarde mensuellement, avril le plus sec eut lieu en 1999 ainsi que juin. Le mois de mai le plus sec concerne 1996, suivi de près par 1998 et 1999. Enfin une année est particulièrement plus sèche que les autres durant tout l'été. Il s'agit de 2002.

### ✓ Précipitations pluvieuses

Les précipitations fournissent aussi des informations intéressantes, tant du point de vue des quantités que du nombre de jours affecté par elles. La Figure 2.21 montre que les débuts de printemps de la décennie étudiée sont plus « mouillés » que la normale mais qu'en revanche, dès le mois de juin la tendance s'inverse au profit de mois beaucoup plus secs que la normale, notamment en ce qui concerne août. Le type de précipitation en intensité et en durée, est ainsi un critère non négligeable. A ce propos, la Figure 2.22 présente la distribution saisonnière des précipitations. Deux critères retiennent l'attention. Le premier concerne le nombre de jours de pluie par mois, le second la quantité précipitée par évènement pluvieux. Les mois du printemps sont déterminants pour la croissance de la plante. Une quantité suffisante de pluie est nécessaire à son bon développement. Quel lien peut-on établir avec les concentrations de pollen mesurées en fin d'été ?

En revanche, il est possible d'imaginer que les précipitations estivales des mois d'août et septembre puissent avoir un impact négatif sur les quantités de pollen mesurées, d'autant plus si elles sont de nature brutale telles à l'occasion d'orages.

La Figure 2.23 présente le nombre de jours mensuel de précipitations non nulles par année. Le Tableau 2.8 fournit les quantités retranscrites graphiquement sur la Figure 2.24. Les mois d'avril et mai sont en moyenne plus humides durant la période 1994-2003 que ne l'est la normale 1971-2000.

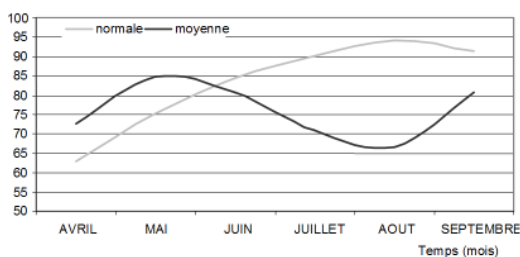


Figure 2.21 : Représentation graphique de la moyenne mensuelle de la pluviométrie mesurée entre 1994 et 2003 comparée à la normale de la période 1971-2000

La situation est en revanche inversée pour tous les autres mois de juin à septembre. Les printemps sont donc globalement plus humides que la normale et les étés plus secs (Figure 2.21). Par ailleurs, les normales mensuelles 1971-2000 tendent à augmenter avec le temps alors que les moyennes mensuelles 1994-2003 sont quasiment inversées, laissant sous entendre un assèchement relatif des mois estivaux étudiés comparativement aux 30 années de référence (Tableau 2.8).

QUANTITES (mm)	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	moyenne 84-03	normale 71-00
AVRIL	99.4	70.7	117.0	68.5	37.0	18.5	98.5	14.0	57.4	78.9	72.8	63.0
MAI	100.9	72.7	84.0	68.6	33.0	44.5	152.9	72.5	128.5	110.5	84.8	75.2
JUIN	144.1	56.9	63.0	96.5	52.0	89.5	79.0	77.5	80.0	70.0	80.9	84.4
JUILLET	41.6	113.1	85.0	135.5	88.5	74.0	47.5	33.0	37.0	54.0	71.0	90.1
AOÛT	66.6	109.4	24.5	97.9	83.5	58.0	84.5	53.5	11.0	79.0	66.8	84.2
SEPTEMBRE	38.4	48.5	106.5	92.0	44.0	194.5	65.5	67.0	46.9	104.0	80.7	81.3
PRINTEMPS	335.4	280.3	324.0	253.9	122.0	153.5	308.0	184.0	266.0	257.4	238.4	222.6
ETE	146.6	271.0	216.0	325.4	217.0	326.5	197.5	153.5	94.5	237.0	218.5	275.6
SAISON	482.0	471.3	540.0	579.0	339.0	480.0	505.5	317.5	390.5	494.4	456.9	498.2

Tableau 2.8 : Quantités de précipitations mensuelles accumulées par année à l'étude

En avril, les années 1994 et 1996 connaissent des précipitations dans plus de 2/3 des cas. Elles sont suivies par les années 2000 et 2002 qui connaissent toutes deux 16 épisodes pluvieux au cours de leur mois d'avril respectif mais qui demeurent somme toute, proches de la moyenne de la période. L'année 2001 expérimente le moins grand nombre de fois ce type d'évènement (5 fois), suivie des années 1999 et 2003 (10 fois), 1997 (11 fois) et 1998 (12 fois). Si avril 2001 est le mois le moins pluvieux (en nombre de jours), il est aussi le plus sec (14 mm accumulés contre 72.8 en moyenne et 63 selon la normale 1971-2000), plus particulièrement caractérisé par quelques rares pluies fines (Tableau 2.8 et Figure 2.24).

Avril 1996 est quand à lui, le plus mouillé tant en nombre de jours qu'en quantités tombées puisque près de 3 fois plus mouillé que la normale. Il se définit par toute la panoplie des types de pluies de faibles à très fortes (Figure 2.25). Avril 2000 compte également parmi les mois mouillés bien que présentant un nombre de jours de précipitations proche de la moyenne mais il se caractérise par des précipitations plutôt moyennes à fortes. Le plus grand nombre de précipitations violentes est enregistré en 1997. Les années 1999 et 1998 comptent parmi les plus sèches en termes de quantités, toutes deux caractérisées par des précipitations de type fines à moyennes.

Le mois de mai est assez dans la moyenne pour l'ensemble de la période, soit tournant autour de 15 jours par mois. Seules les années 1999, 1998 et 1996 sont vraiment en deçà (Figures 2.22 et 2.23). L'année 1998 suivie de près par 1999 présente des quantités de pluie accumulées environ 2 fois moins importantes que la normale et la moyenne. Il s'agit donc de mois de mai extrêmement secs dont les précipitations se caractérisent (Figure 2.26) par une dizaine de jours de faibles pluies et une absence complète de fortes précipitations en 1998.

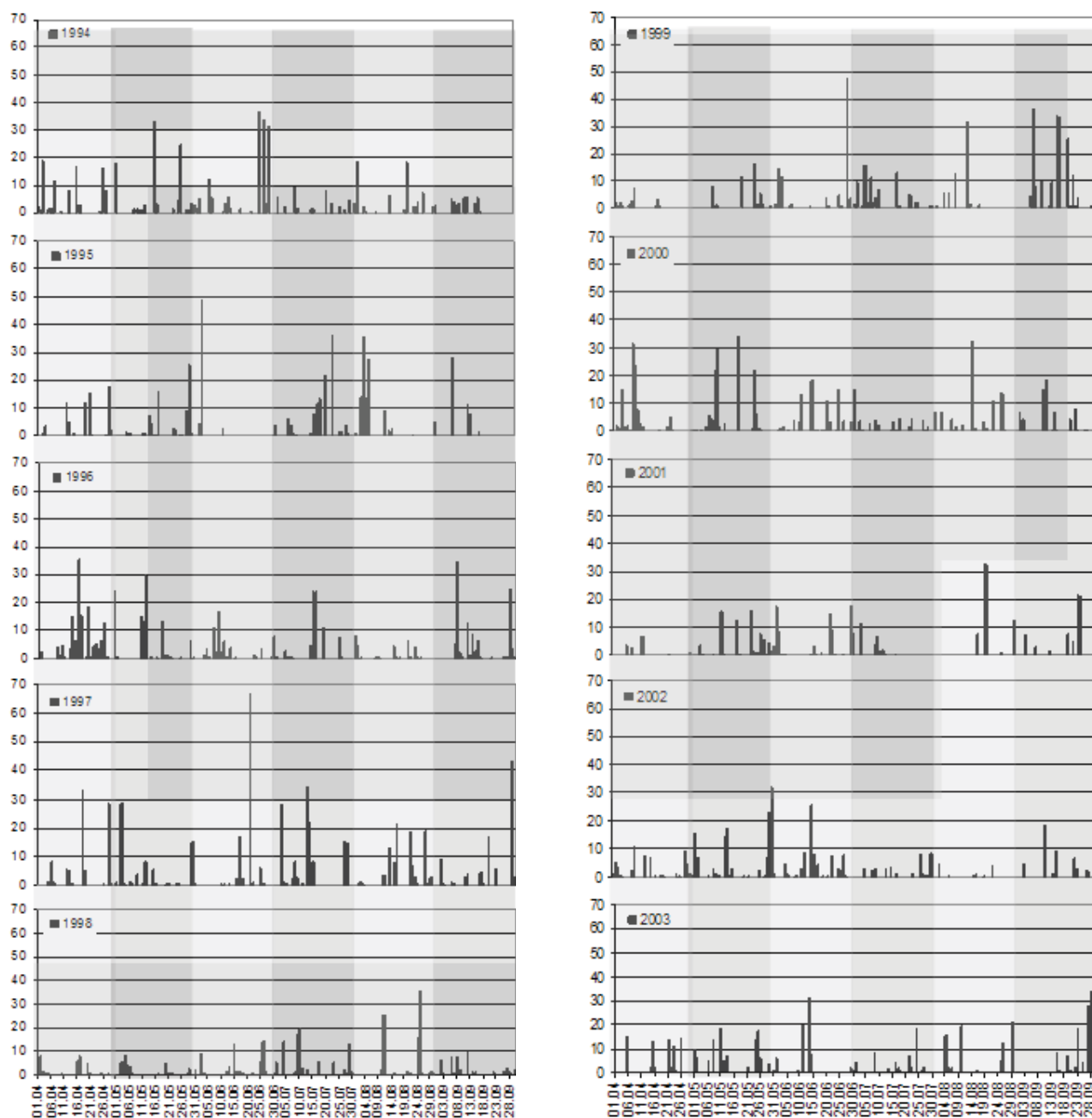


Figure 2.22 : Distribution graphique des précipitations quotidiennes en mm à l'aéroport international Pierre-Elliott Trudeau du mois d'avril à la fin septembre 1994-2003



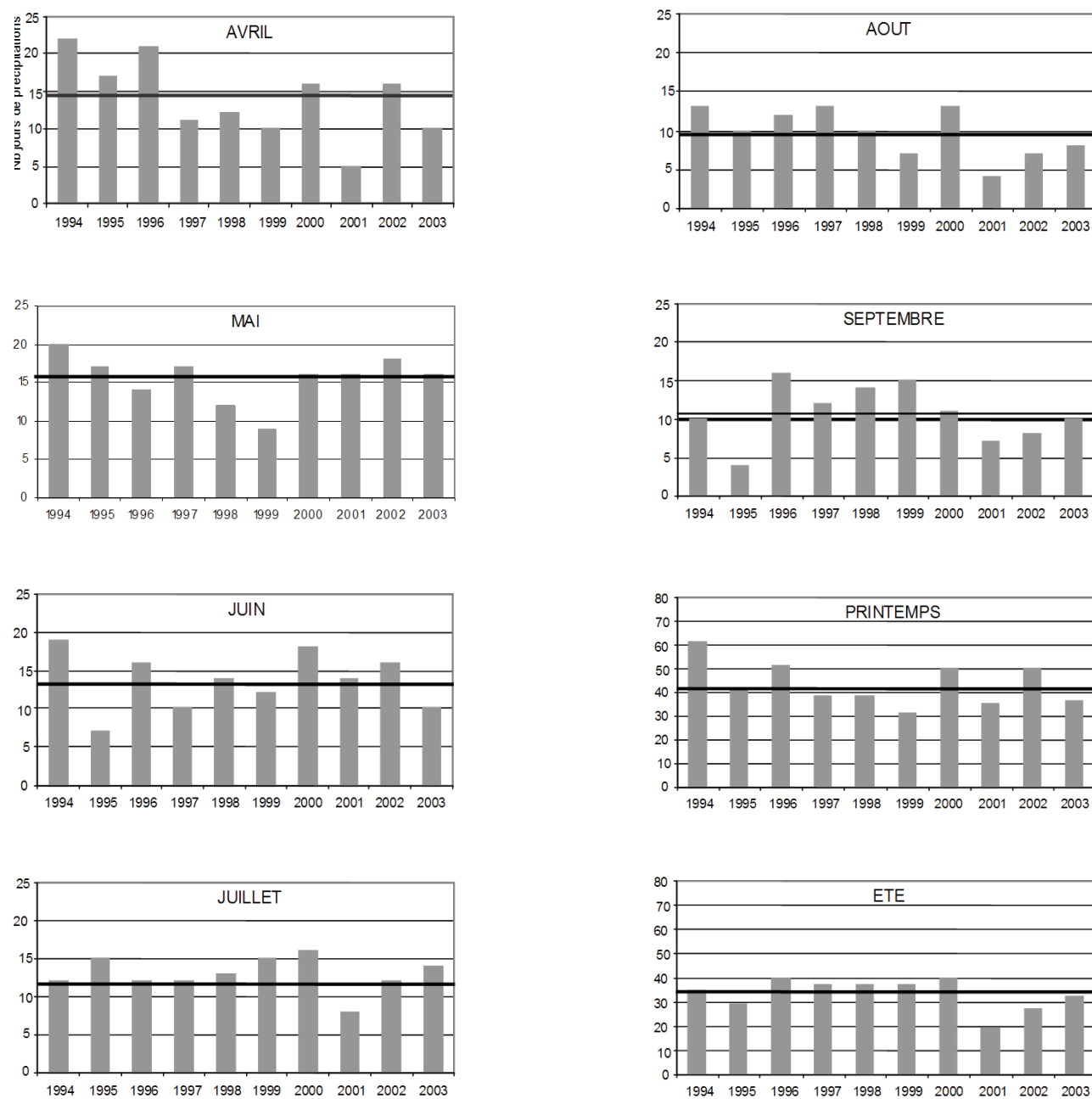


Figure 2.23 : Evolution du nombre de jours de précipitations durant les mois d'avril 1994 à 2003 pour des quantités de précipitations non nulles

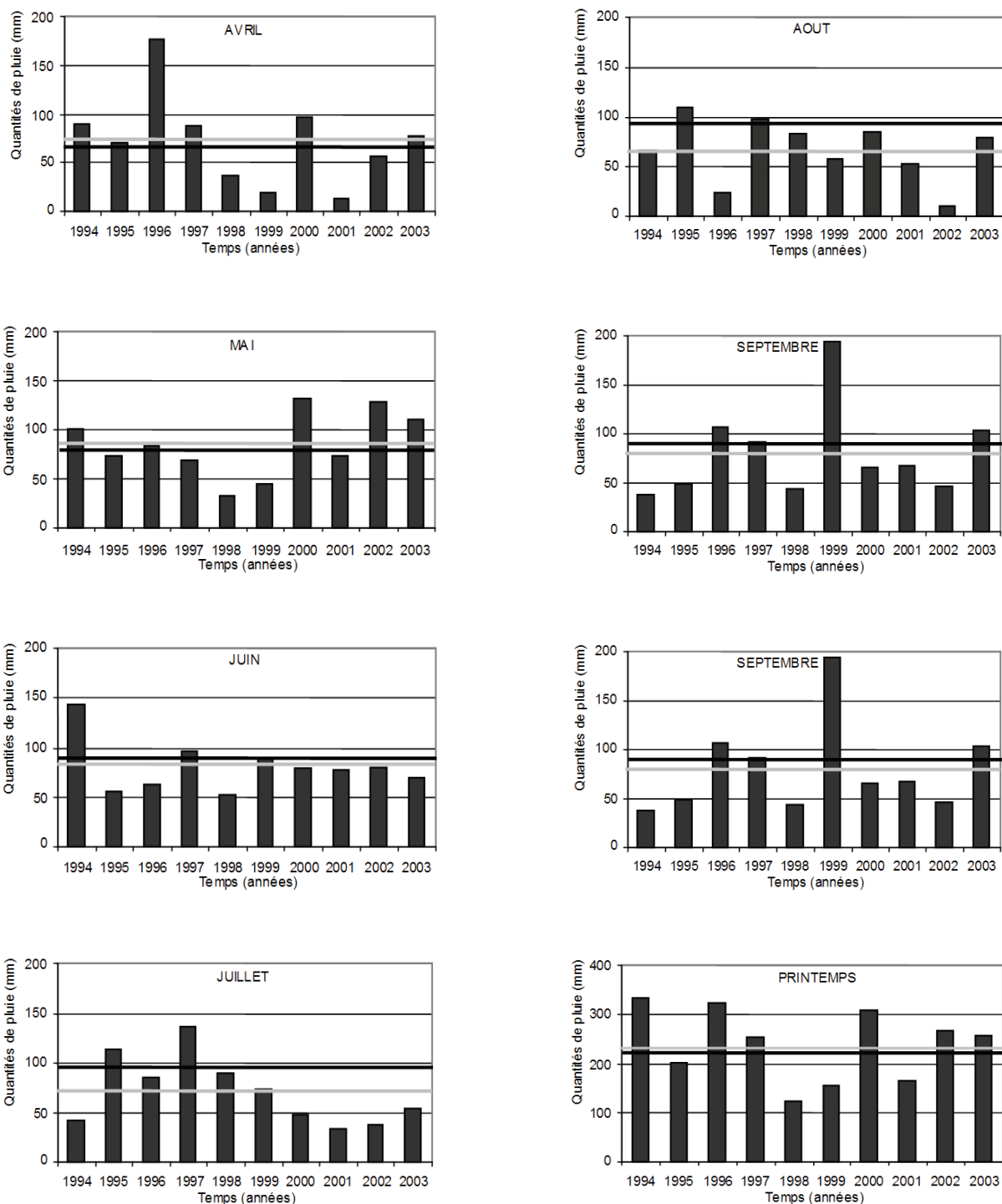


Figure 2.24: Représentation graphique des quantités de pluie accumulées par mois et par année et comparées à la moyenne 1994-2003 (trait rouge) et la normale 1971-2000 (trait bleu)

En 1999, la situation est différente, les faibles pluies sont quasi absentes au profit de deux épisodes de fortes précipitations. Les années 2000, 2002 et 2003 se caractérisent quant à elles par des quantités totales de précipitations plutôt généreuses qui se distribuent en pluies fines mais se caractérisent aussi par des pluies fortes et fréquentes surtout en 2003 voire même très intenses dans les cas de 2000 et 2002. L'année 2002 compte le plus grand nombre de jours de pluie (plus de la moitié du mois) et de manière plus générale, nous pouvons dire que le début des années 2000 est marqué par des mois de mai plus mouillés que la fin des années 90 avec notamment une augmentation du nombre de jours de précipitations supérieures à 10 mm mais pas des événements extrêmes à part en 2000 et 2005 ( $\geq 25$  mm).

Le mois de juin (Figure 2.27) présente une signature particulière d'une année sur l'autre. Le plus sec est celui de l'année 1995 et le plus pluvieux celui de l'année 2000. Les années 1994, 1996 et 2002 la suivent et se suivent de près. Ce qui fait de juin 1994 un mois assez humide est en fait une succession de 3 épisodes de pluie intense ( $\geq 25$  mm) au cours de la dernière semaine du mois. 2001 et 1998 se trouvent dans la normale et 1999, 1997 et 2003 sont bien en deçà et de la moyenne et de la normale. Il s'agit donc d'années sèches. En 1997, 1999 et 2003, les précipitations sont essentiellement le résultat d'un, voire de deux événements intenses. C'est d'ailleurs en juin que l'on retrouve les événements les plus intenses des 10 ans à l'étude (1997 : 68 mm, 1995 : 50mm, 1999 : 49 mm) (Figure 2.41).

Globalement les printemps (Figure 2.28) les plus pluvieux en terme de nombre de jours de pluie ( $\geq 0.2$  mm) sont 1994, 1996, 2000 et 2002 avec en 1994 prioritairement les mois d'avril et juin, en 1996 le mois d'avril, en 2000, le mois de juin et en 2002 le mois de mai. Les années les plus sèches sont 1999, 2001 et 2003 avec en 1999, avril et mai, en 2001 le mois d'avril et en 2003, avril et juin. Les printemps 1995, 1997 et 1998 sont dans la moyenne en termes de nombre de jours de pluie. Les mois les plus pluvieux sont aussi les plus mouillés. En revanche, les printemps les plus secs, c'est-à-dire ayant accumulé les plus faibles quantités de pluie sont 1998, 1999, 2001 et 1995.

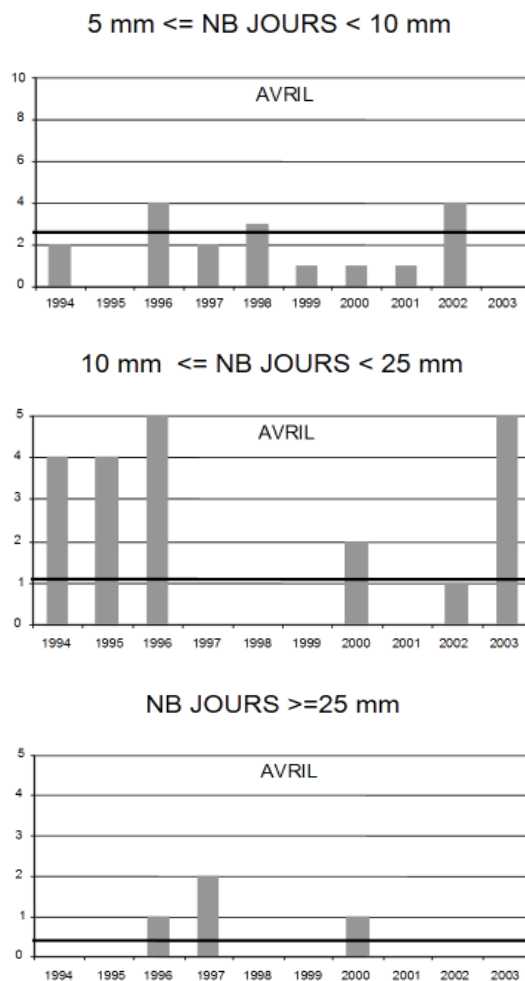
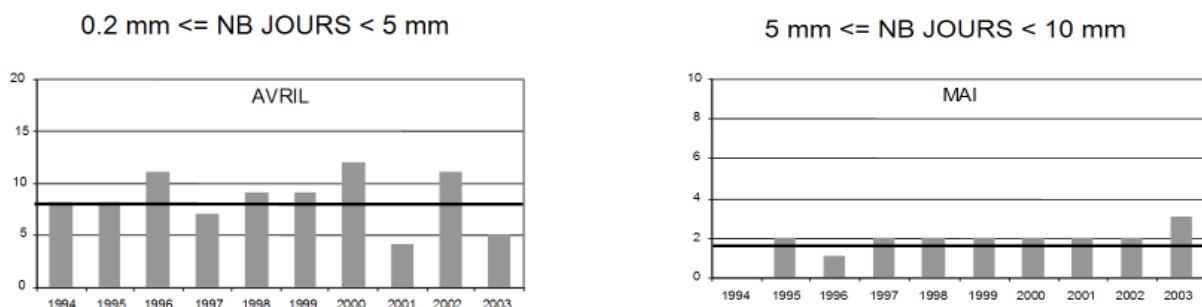


Figure 2.25 : Evolution du nombre de jours de précipitations durant les mois d'avril 1994 à 2003 pour des quantités de précipitations données



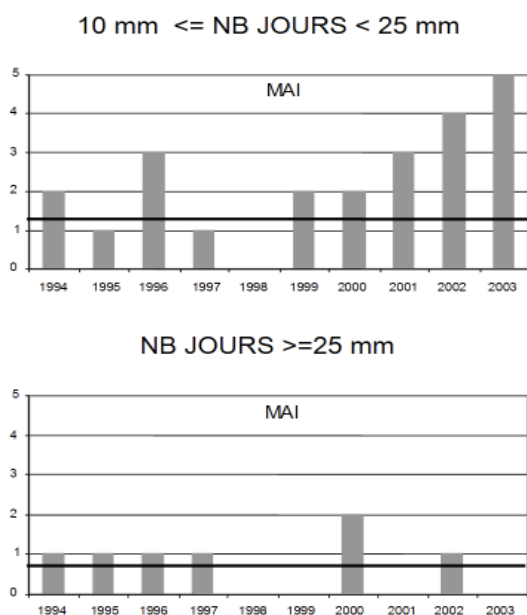


Figure 2.26 : Evolution du nombre de jours de précipitations durant les mois de mai 1994 à 2003 pour des quantités de précipitations données

En juillet (Figure 2.29), si 2000 est l'année la plus pluvieuse de toutes, elle n'est pas en revanche la plus mouillée et se caractérise par une succession de toutes petites précipitations. Les années 1999 et 1995 suivent en terme de nombre de jours de pluie mais sont quant à elles marquées par quelques événements plus importants voire une fois  $\geq 25$  mm en 1995. En revanche, 1997 est la plus mouillée suivie par 1995. Juillet 1997 se caractérise quant à lui par quelques épisodes de pluie forte à très forte au dépend des pluies fines. Le mois de juillet le plus sec a lieu en 2001 tant en nombre de jours de pluie qu'en quantité de précipitations accumulées (1/3 des quantités normales et 1/2 de la moyenne de la période à l'étude).

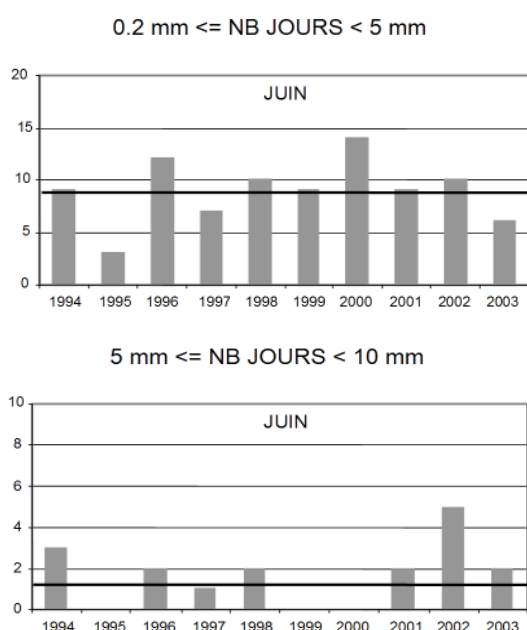


Figure 2.27 : Evolution du nombre de jours de précipitations durant les mois de juin 1994 à 2003 pour des quantités de précipitations données

En août (Figure 2.30) les années 1994, 1997 et 2000 sont les plus pluvieuses de la décennie avec environ 13 jours de pluie par mois et l'année 1997 est notamment marquée par 5 épisodes de précipitations de plus de 10 mm, toutefois 1995 est la plus mouillée avec quelques épisodes de pluie forte voire très forte. Le mois d'août 2002 est sans conteste le plus sec de la décennie même si c'est 2001 qui compte le moins grand nombre de jours de pluie. La moyenne de la période est bien en deçà de la normale de la saison. Nous pouvons remarquer à la Figure 2.22 que les années 1998, 1999, 2000, 2001 ont connu après la mi-août plusieurs événements de précipitations intenses.

En septembre enfin, les années 1996 et 1999 sont les plus pluvieuses de la décennie et connaissent, en particulier 1999, une succession anormalement élevée de journées de précipitations intenses. Ces journées ont-elles eu pour effet de raccourcir la saison pollinique d'ambrosie cette année-là ?

Dans l'ensemble il semble qu'en nombre de jours (Figure 2.23), septembre soit plus pluvieux qu'août à part en 1995, 1997 et 2000 mais plus sec que juillet à part en 1996 et 1998. Le mois de septembre le moins pluvieux est à attribuer à 1995 et le plus pluvieux à 1996. En revanche, c'est 2001, 2002 et 1994 qui sont les plus secs et 1999 dépasse très largement tous les autres. 1996 et 2003 sont les plus mouillés en termes de quantité de pluie reçue. L'année 1999 domine toutes les autres, conditionnée par 4 événements pluvieux très intenses. L'effet majeur de telles précipitations en fin de saison peut être d'interrompre brutalement la saison.

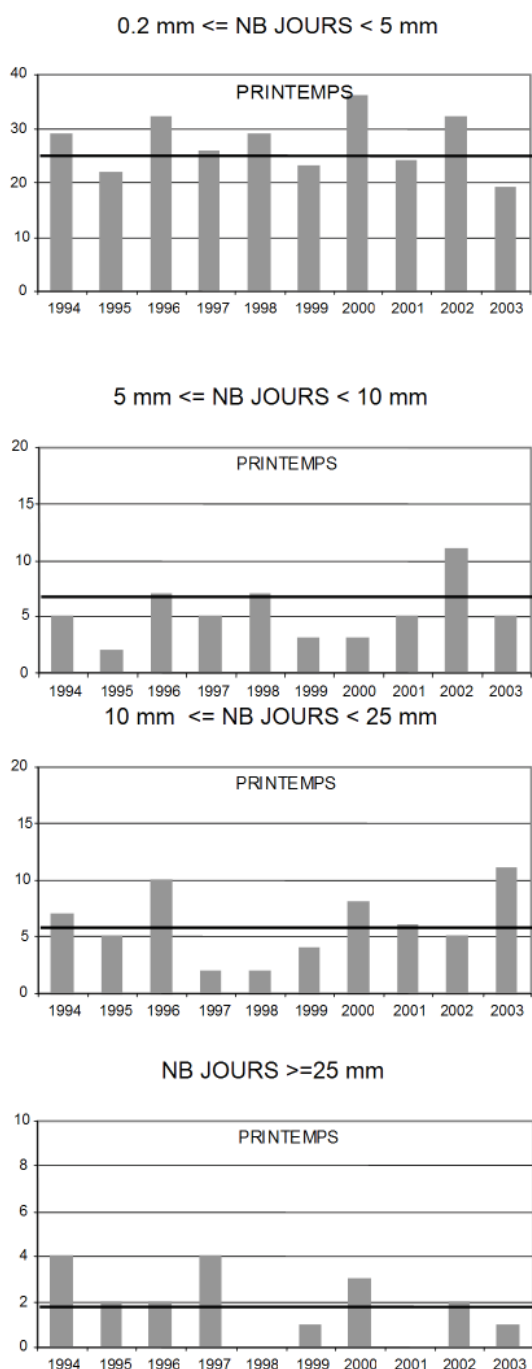


Figure 2.28 : Evolution du nombre de jours de précipitations durant les printemps 1994 à 2003 pour des quantités de précipitations données

En conclusion et comme nous pouvons le voir à la Figure 2.23 le nombre de jours de pluie par an est assez homogène d'année en année avec une moyenne autour de 35 jours pour les 3 mois de l'été. Il faut toutefois noter que trois dernières années de la décennie connaissent moins d'épisodes pluvieux que le reste de la période étudiée avec l'année 2001 qui n'est pas pour autant l'été le plus sec. Le record de sécheresse revient à l'été 2002 plus de deux fois plus sec que la moyenne voire 3 fois plus que la normale. Globalement les étés étudiés sont

en moyenne moins pluvieux et plus secs que la normale de la saison du fait d'une forte tendance à la baisse du nombre de jours moyen global de précipitations plus particulièrement en août comparativement à la normale 1971-2000.

Du point de vue du patron des précipitations intenses (Figure 2.32), août et septembre sont dans la normale alors que juillet est bien en deçà (Figure 2.33a). Le constat est exactement le même avec les journées de précipitations de plus de 5 mm. Il semble en revanche qu'au cours de cette période, il y ait une tendance à l'augmentation du nombre de petites pluies en juillet. On trouve en fait plus de jours de pluie au cours de la dernière décennie au printemps et en mai en particulier que pendant l'été. En revanche, le nombre de journées d'événements extrêmes ( $\geq 25$  mm) est à la hausse au printemps de même qu'en fin d'été.

En termes de quantité (Figure 2.21), notons un très net assèchement marqué en fin de printemps et pendant l'été comparativement aux valeurs de la normale. Le printemps et notamment avril et mai quant à lui est plus mouillé que ne le furent les années antérieures.

Finalement il est possible de dire qu'à partir de 1998 et jusqu'à la fin de la décennie étudiée, mis à part en 2000, toutes les années (printemps et étés confondus) sont bien en deçà des valeurs de la normale en terme de quantité de pluie mesurée. L'année 2000 est juste dans la norme. Préalablement 1994 et 1995 avaient aussi été légèrement sous la norme mais 1996 et 1997 avaient rééquilibré le tout. Les années 2001 et 1998 sont manifestement des années de forte sécheresse. Avec 1999 et 2002, elles furent les plus sèches de la décennie. Les printemps 1998 et 1999 ont manqué d'eau ainsi que 2001 et 1995, ce qui n'est pas le cas de 2000, 2002 et 1996 qui furent au contraire plutôt beaucoup arrosés.

Enfin les étés, 1998 suivi de 2000, 2001 pour atteindre un paroxysme en 2002 puis une remontée importante mais au demeurant insuffisante en 2003, furent des étés très secs. Notons qu'au cours des 10 années d'étude, seuls 1997 et 1999 se situent au-dessus de la normale de saison. Remarquons par ailleurs qu'à part le mois de septembre 1994, c'est au cours de la seconde partie de notre échantillon, à compter de l'année 1998, que la récurrence de périodes très sèches est la plus grande (04/2001, 05/1998, 06/1998, 07/2001 et 08/2002 ainsi que 0607/2002, 0809/2002, 0409/2001, 0405/1999, 0406/1998 et 0709/2002).



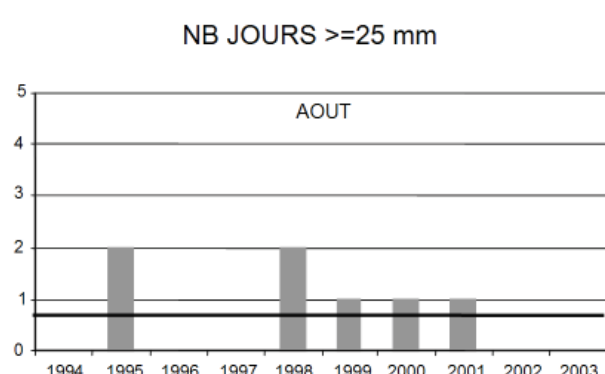
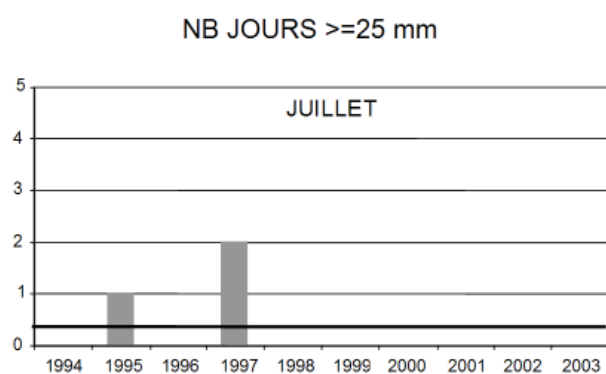
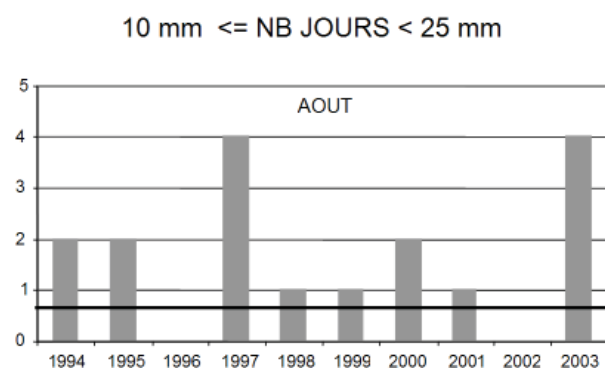
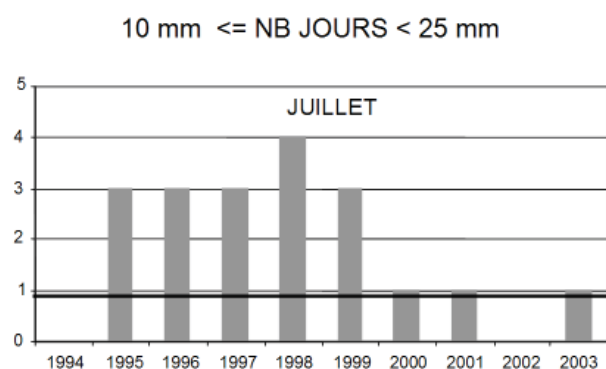
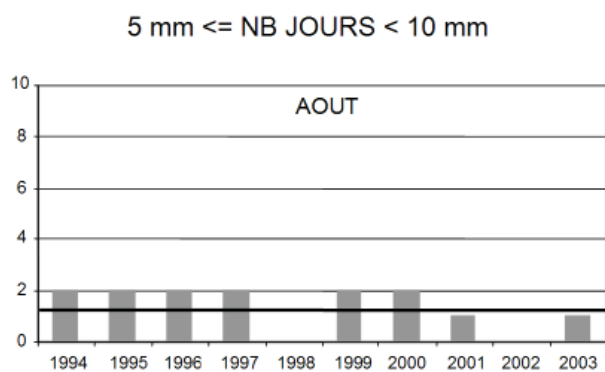
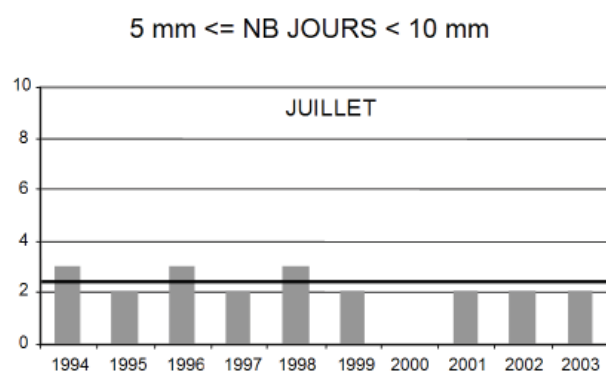
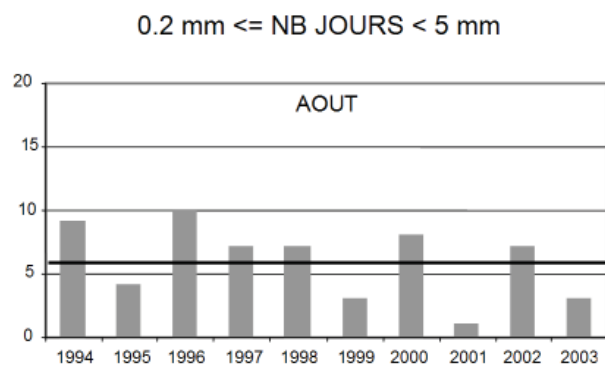
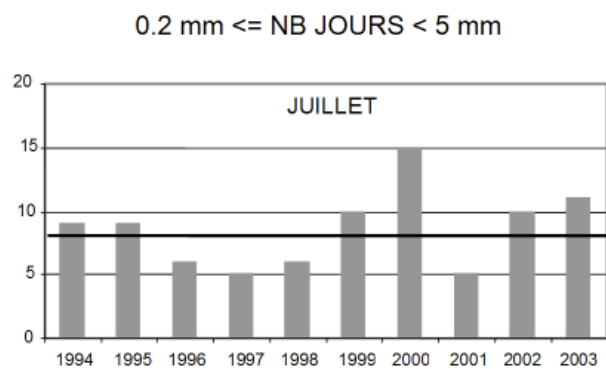


Figure 2.29 : Evolution du nombre de jours de précipitations durant les mois de juillet 1994 à 2003 pour des quantités de précipitations données

Figure 2.30 : Evolution du nombre de jours de précipitations durant les mois d'août 1994 à 2003 pour des quantités de précipitations données

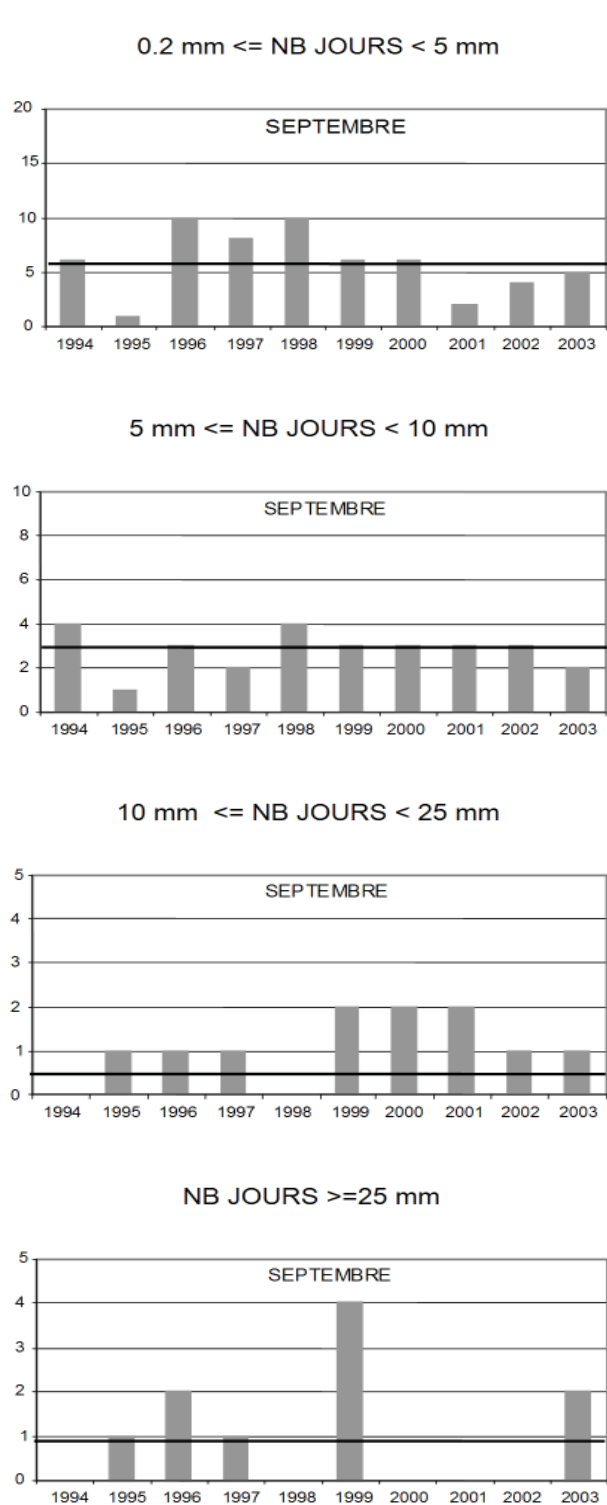


Figure 2.31 : Evolution du nombre de jours de précipitations durant les mois de septembre 1994 à 2003 pour des quantités de précipitations données

Pour finir, comme nous l'avons déjà précisé dans le chapitre 1, les précipitations peuvent avoir différents types d'impacts sur les quantités de pollen mesurées. Du type de précipitation peut aussi dépendre l'ampleur de cet effet. De manière générale, la pluie a tendance à empêcher la libération du pollen ou tout au moins à

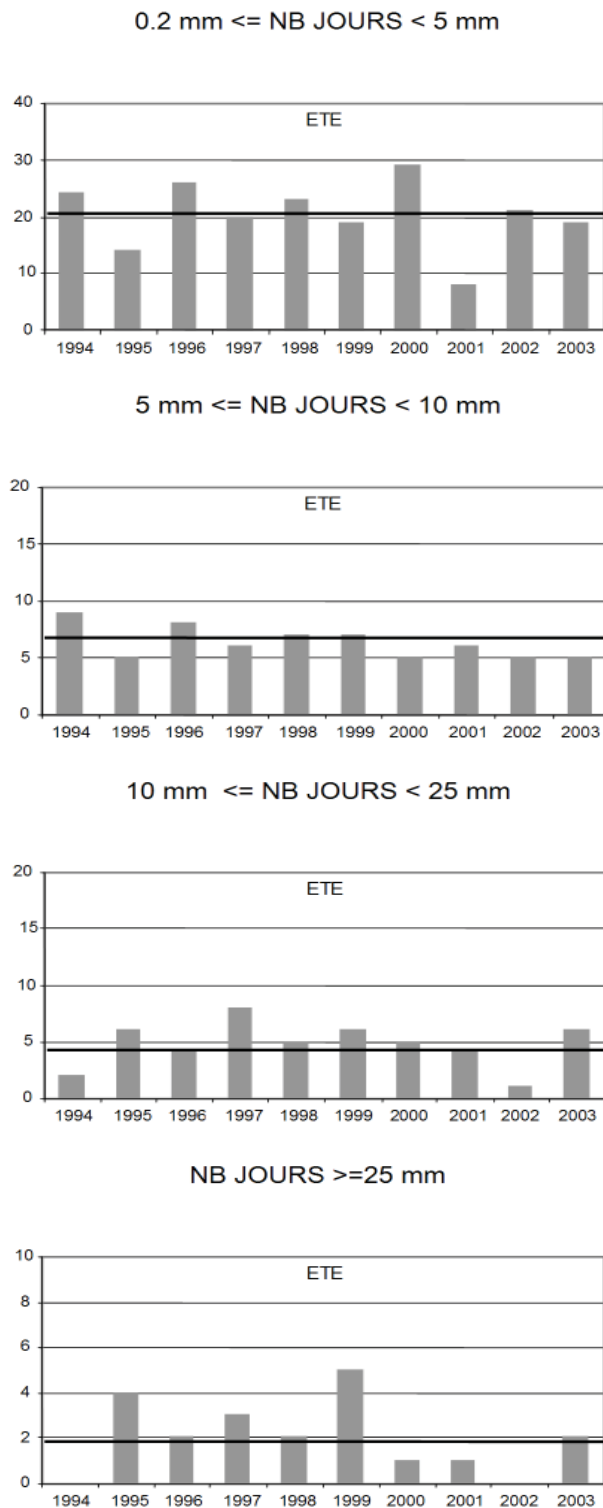


Figure 2.32 : Evolution du nombre de jours de précipitations durant les étés 1994 à 2003 pour des quantités de précipitations données

limiter sa prise en charge par l'air en l'alourdissant et en empêchant ainsi sa prise en charge par le vent.

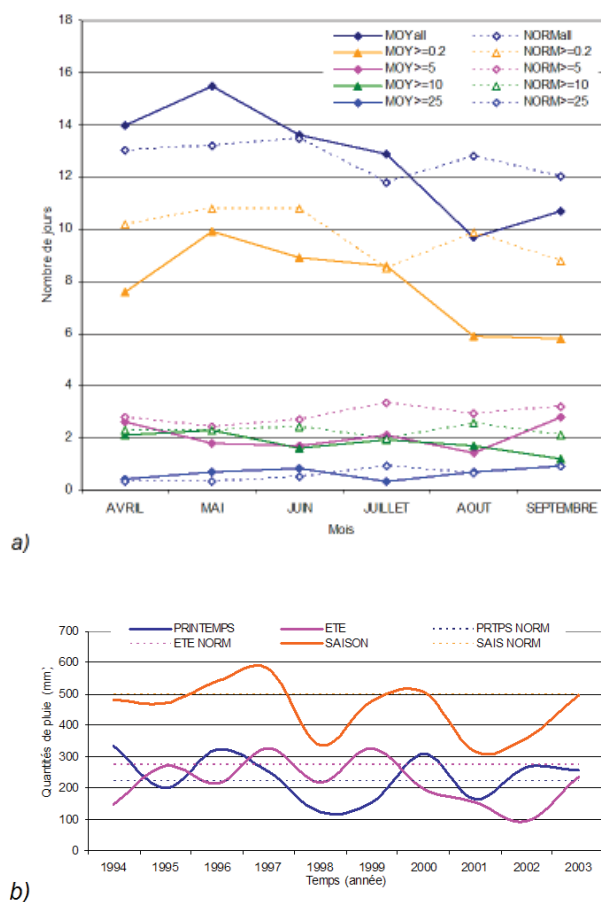


Figure 2.33 : (a) Représentation graphique du nombre de jours moyen mensuel mesuré entre 1994 et 2003 comparativement à la normale de la période 1971-2000 pendant laquelle on enregistre des précipitations et (b) Comparaison entre les quantités moyennes saisonnières annuelles mesurées entre 1994 et 2003 et la normale 1971-2000

La plante peut le conserver et le libérer une fois l'épisode pluvieux achevé et les conditions plus favorables de nouveau installées. Une pluie forte et intense ou fine mais durable va avoir pour effet de lessiver l'atmosphère de tout pollen et ainsi limiter les comptes polliniques mesurés. Les conditions orageuses peuvent aussi générer des situations particulières. En effet, les forts vents à l'approche du front orageux sont la plupart du temps assortis de quantités abondantes de pollen dans l'atmosphère liées au brassage de l'air et à la remise en suspension de particules déjà déposées sur les surfaces. S'en suit ensuite un lessivage intense de ces quantités une fois que l'orage éclate. Il nous intéresse donc de nous concentrer quelques peu sur les précipitations orageuses des mois d'août et septembre qui correspondent au fond à la pleine saison de l'ambroisie afin de voir dans quelle mesure ces événements sont récurrents d'année en année et comment ils agissent sur les concentrations de pollen mesurées. Le Tableau 2.9 recense les orages enregistrés en juillet août et septembre des années 1994 à 2003 (1996 et 1997 sont manquantes).

Orages	1994	1995	1998	1999	2000	2001	2002	2003
07 (normale : 7)	8	8	9	10	6	6	7	3
08 (normale : 6)	6	5	7	0	5	5	4	5
09 (normale : 2)	3	1	4	2	1	2	4	2
Total été (normale : 15)	17	14	20	12	12	13	15	10

Tableau 2.9 : Recensement des orages s'étant produits entre 1994 et 2003 durant l'été

Remarquons que les années pendant lesquelles les quantités de pollen sont les plus fortes ne correspondent pas nécessairement aux années pendant lesquelles le nombre d'orages est le plus bas. L'été 1999 ne connaît que peu d'orages mais en revanche 1998 et 2000 ou 2001 en ont connu un certain nombre. Tout dépend probablement du moment de la journée pendant lequel a lieu l'orage et aussi du jour pendant la saison. La Figure 2.34 permet de faire le lien entre courbe pollinique et épisode pluvieux. Il est probable que dépendamment du type de précipitations, l'impact sur les concentrations varie. S'il s'agit d'orages de matin ou de fin de journée ou de nuit, l'effet n'est pas le même. Il n'est pas difficile de remarquer que les chutes marquées des quantités de pollen le sont principalement à l'occasion d'orages ayant lieu en matinée, moment durant lequel la pollinisation bat son plein. Il est ainsi possible d'avancer que l'année 2001 à l'allure si particulière de ses courbes polliniques a connu un événement très intense de précipitations en plein cœur habituel de la saison ce qui a eu pour effet de repousser le pic majeur plus tard. La consultation du sommaire météorologique confirme l'occurrence de plusieurs orages intenses le 20/08/2001 avant midi.

### iii. Conditions d'ensoleillement

L'ensoleillement a-t-il un impact notable sur le développement des plants au printemps ? A-t-il des répercussions sur la quantité de pollen que nous mesurons ensuite pendant l'été ? L'ensoleillement de la période estivale est-il également significatif de la quantité de pollen qui se retrouve dans l'air ?

Avril, août et septembre sont plus ensoleillés que la normale alors que c'est l'inverse dans le cas de mai et surtout juillet durant la période 1994-2003 (Figure 2.35). Pour résumer, début du printemps et fin de l'été ont connu plus d'heures d'insolation que la normale et inversement de la fin du printemps au début de l'été.

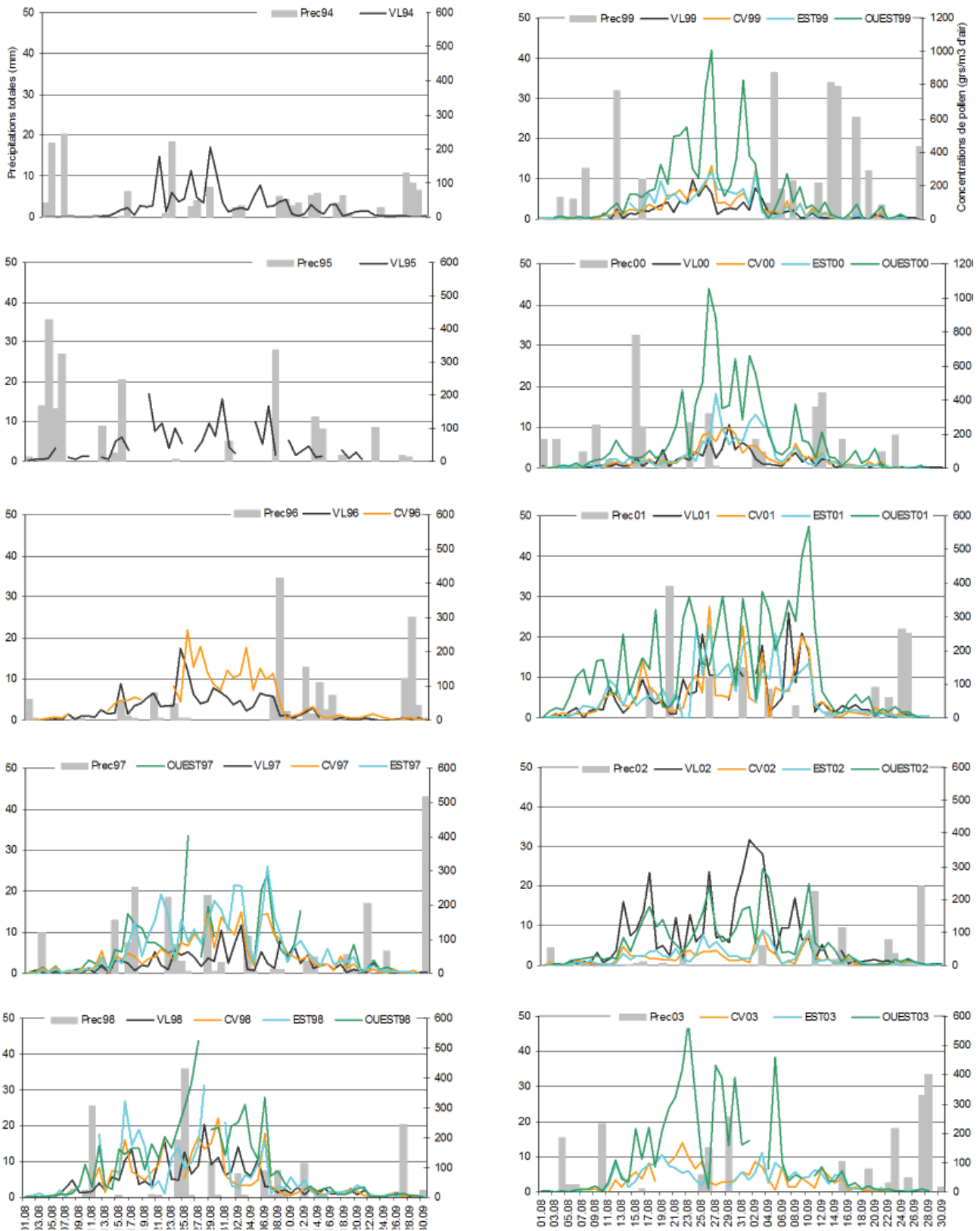


Figure 2.34: Concentrations polliniques quotidiennes mesurées par station et précipitations quotidiennes totales mesurées à l'aéroport international Pierre-Elliott Trudeau de Montréal de 1994 à 2003

Le Tableau 2.10 présente le nombre total d'heures d'insolation mensuel et saisonnier enregistré par année à l'aéroport PET de Montréal en comparaison avec la normale 1971-2000 et la moyenne mensuelle 1994-2003 et la Figure 2.36 présente pour les mois d'avril à septembre, la distribution de ces valeurs d'insolation effective mesurées.

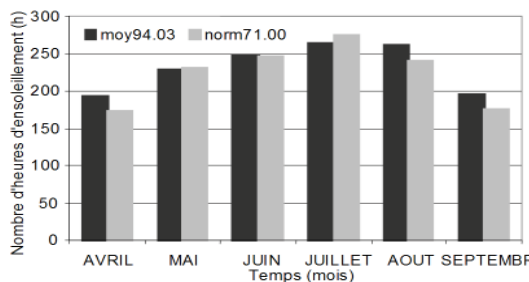


Figure 2.35: Insolation effective moyenne de la période 1994-2003 à Montréal des mois d'avril à septembre comparativement aux normales mensuelles de la période 1971-2000

Le mois de juillet est le mois habituellement le plus ensoleillé suivi d'août, puis juin, mai, avril et enfin septembre. L'analyse mensuelle de ces informations nous montre que concernant le mois d'avril, la moyenne de la période se trouve bien au-delà de la normale saisonnière. Cependant 3 des 10 années se trouvent bien en deçà de cette normale. Elles sont 1996, 1994 et 2000. En revanche, avril 2001, 1999, 1998 et 1997 se situent de beaucoup au-delà de la normale. Ces 4 années ont connu des mois d'avril particulièrement ensoleillés et secs d'ailleurs.

PERIODE	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moy 94-03	Norm 71-00
AVRIL	156.8	176.3	135.0	226.5	238.9	245.0	147.0	263.4	182.4	165.1	193.6	173.3
MAI	226.0	244.8	276.6	182.9	260.5	295.8	178.2	225.9	198.0	200.1	229.7	229.7
JUIN	247.4	313.5	192.3	318.3	180.6	256.6	212.0	257.0	217.5	287.7	248.3	245.5
JUILLET	260.5	267.8	247.3	275.8	279.7	273.6	234.2	246.6	298.6	259.4	264.4	274.3
AOUT	238.9	298.1	289.6	234.0	255.4	254.6	229.2	271.1	299.6	241.8	260.5	240.5
SEPTEMBRE	169.7	216.2	180.9	157.6	177.2	176.4	202.0	232.1	223.5	217.2	195.3	174.6
PRTPS	630.2	734.6	603.9	727.7	680.0	797.4	537.2	746.3	597.9	652.9	670.8	648.5
ETE	667.1	780.1	717.8	667.4	712.3	704.6	665.4	749.8	821.6	718.4	720.5	689.4

Tableau 2.10 : Totaux d'insolation mensuels et saisonniers enregistrés à PET

En mai, moyenne et normale s'accordent. 1997, 2000, 2002 et 1994 et jusqu'à un certain point 2001 se situent en dessous de la moyenne. Les 6 autres années connaissent beaucoup plus de soleil. Les années 1999, 1996 et 1998 sont particulièrement gâtées. 1998 et 1999 le sont d'autant plus qu'avril avait été particulièrement ensoleillé déjà. Le mois de juin est marqué par une alternance d'une année sur deux au dessus ou en dessous de la moyenne qui là encore s'accorde avec la normale de saison. Ainsi 1995, 1997, 1999, 2001 et 2003 expérimentent plus de soleil que 1994, 1996, 1998, 2000 et 2002. Si 1998 avait été vraiment gâté en avril et mai, ce n'est pas le cas en juin de cette année qui se trouve au contraire être l'année des 10 ans ayant connu le plus mauvais mois de juin concernant ce paramètre.

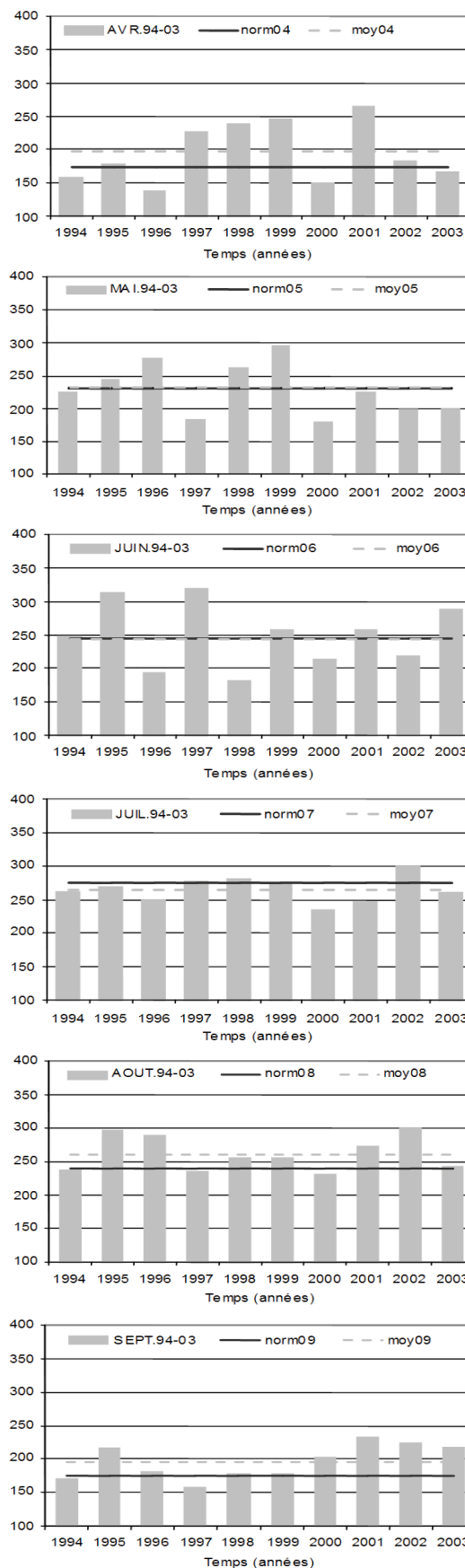


Figure 2.36 : Représentation graphique de l'insolation effective à Montréal pour les mois d'avril à septembre 1994 à 2003



En juillet, les fluctuations sont beaucoup moins marquées d'une année sur l'autre. La moyenne de la période est inférieure à la normale, laissant présumer de conditions d'insolation moins bonnes au cours de ces dix dernières années qu'elles ne le furent sur les 30 années de la période considérées par la normale. L'année 2000 contribue particulièrement dans ce sens avec un mois très peu ensoleillé. Mis à part 2002 qui présente de bonnes conditions, les 8 autres années connaissent des mois de juillet à peine meilleurs que la normale. Notons cependant que juillet 1999 demeure encore plus ensoleillé que la moyenne et que la normale. Août quant à lui montre un peu plus de fluctuations notamment au début et à la fin de la période à l'étude. 2002, 1995, 1996 et 2001 connaissent des mois d'août bien au-dessus de la moyenne, elle-même bien au-delà de la normale. 2000 quant à elle, n'est toujours pas gâtée. En ce qui concerne les autres années enfin, elles se situent toutes autour de la normale. Le mois de septembre enfin est marqué par une amélioration des conditions d'insolation en fin de période. En effet les années 2000 à 2003 auxquelles s'ajoute 1995, se trouvent cette fois-ci toutes bien au-delà de la moyenne, elle-même tirée vers le haut par l'année 2001 particulièrement bien ensoleillée. 1997 est l'année bénéficiant du mois de septembre le moins ensoleillé.

Finalement la Figure 2.37 offre un récapitulatif des conditions d'insolation de 1994 à 2003 selon la période de l'année considérée. Nous retrouvons ici la très forte variabilité des conditions de printemps d'avril à juin. 1999 est au cours du printemps bel et bien l'année la plus ensoleillée contrairement à l'année 2000 qui fut particulièrement mauvaises ainsi que 2002, 1996, 1994 et 2003. Trois autres années sont à conserver en mémoire concernant ces conditions d'insolation plutôt bonnes qui sont : 2001, 1995 et 1997. 1998 se situe dans la moyenne. En été, comme noté précédemment, les fluctuations sont un peu moins fortes avec toutefois les étés 2002 et 1995 qui sortent du lot, suivis de 2001. En revanche, 1994, 1997 et 2000 sont de mauvais étés. Les autres tournent autour de la moyenne. Finalement, sur la saison globale, 1995, 1999 et 2001 voire même dans une moindre mesure 2002, furent des saisons plutôt exceptionnelles du point de vue de l'insolation à l'inverse de l'année 2000 qui fut vraiment catastrophique. Les autres années se situent avec une part raisonnable dans la normale.

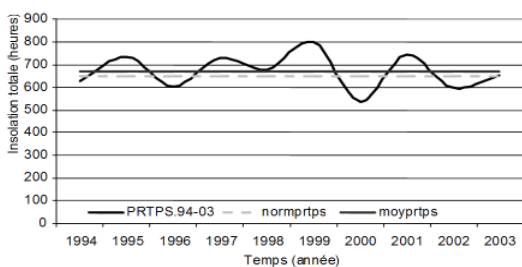
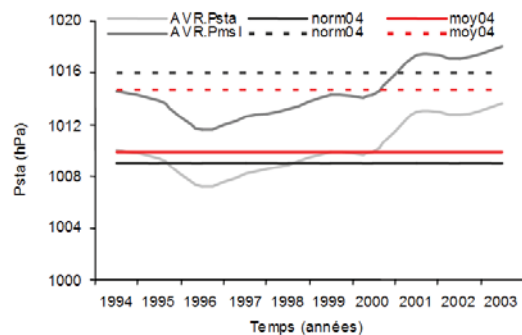


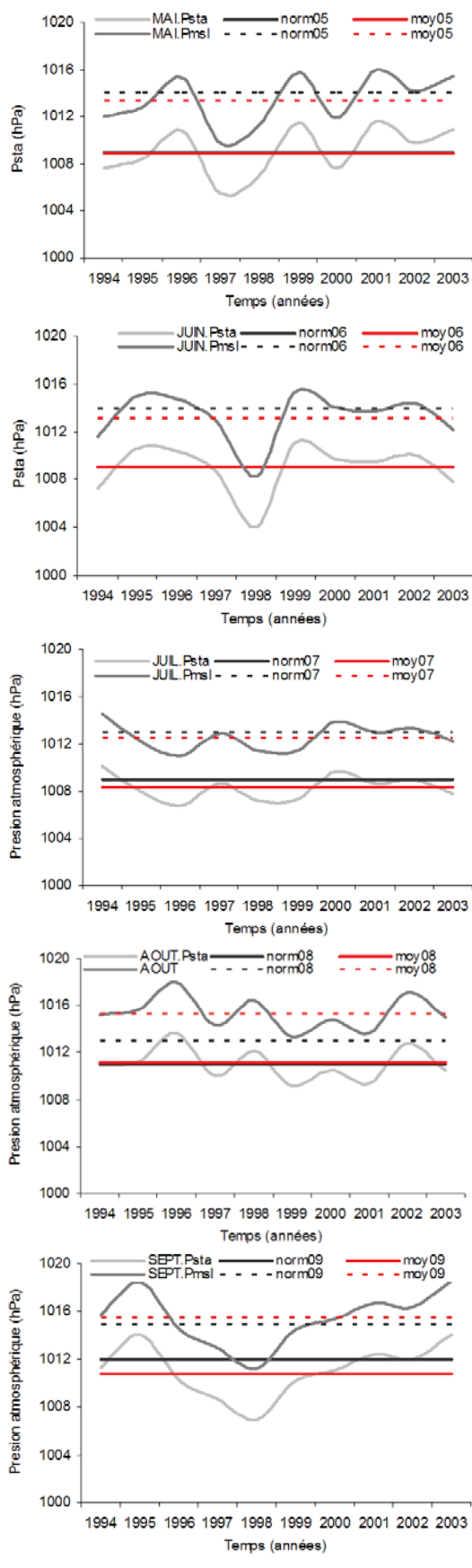
Figure 2.37 : Récapitulatif des conditions d'insolation de 1994 à 2003

iv. Conditions de pression atmosphérique

Deux valeurs de pression sont disponibles. La pression de surface mesurée à la station (Psta) et la pression de surface ramenée au niveau moyen de la mer (Pmsl). La comparaison entre la pression à la station et celle du niveau moyen de la mer, nous montre une colinéarité de variation (Figure 2.38) entre les deux avec le fait que la Pmsl est toujours plus élevée (+5 hPa environ) que la pression à la station. Nous pouvons sans problème particulier employer l'une ou l'autre étant donné le relief très peu marqué de la région à l'étude. En effet, la Pmsl a été développée pour les fins des dynamiciens synoptiques qui avaient besoin de dresser des cartes de champs de pression qui soient découplées de la topographie. Cela revient en fait à lisser la topographie d'un lieu. Dans notre cas, nous allons employer la Pmsl afin de disposer d'une mesure comparable à celle que nous extrayons du modèle (chapitre 3). En effet, la hauteur à laquelle est mesurée la pression de surface dans le modèle et à l'aéroport n'est pas nécessairement la même si bien que pour des fins de comparaison de données, nous employons la Pmsl.

En avril (Figure 2.39), les années 2001, 2002 et 2003 enregistrent des pressions mensuelles moyennes beaucoup plus fortes que la moyenne de la période. Il y a au cours de la décennie une tendance à la hausse de ce paramètre en fin de période. Avril 1996 enregistre la plus basse pression moyenne suivie par 1997. Les autres années se trouvent au niveau de la normale de saison. La moyenne de la décennie surpasse la normale du fait des deux années les plus fortes.





En mai (Figure 2.39), il y a alternance d'années durant lesquelles la pression moyenne au niveau de la station est plus forte que la normale et d'autres inversement. Trois années sortent du lot avec les valeurs les plus élevées. Il s'agit de 1996, 1999 et 2001. En revanche, 1997, 1998, 2000 et 1994 se situent en dessous de la moyenne. En juin, normale et moyenne sont au même niveau. L'année 1998 enregistre des valeurs particulièrement faibles de pression. Nous devons vérifier s'il s'agit d'un épisode en particulier ou d'un ensemble de situations de faible amplitude barométrique.

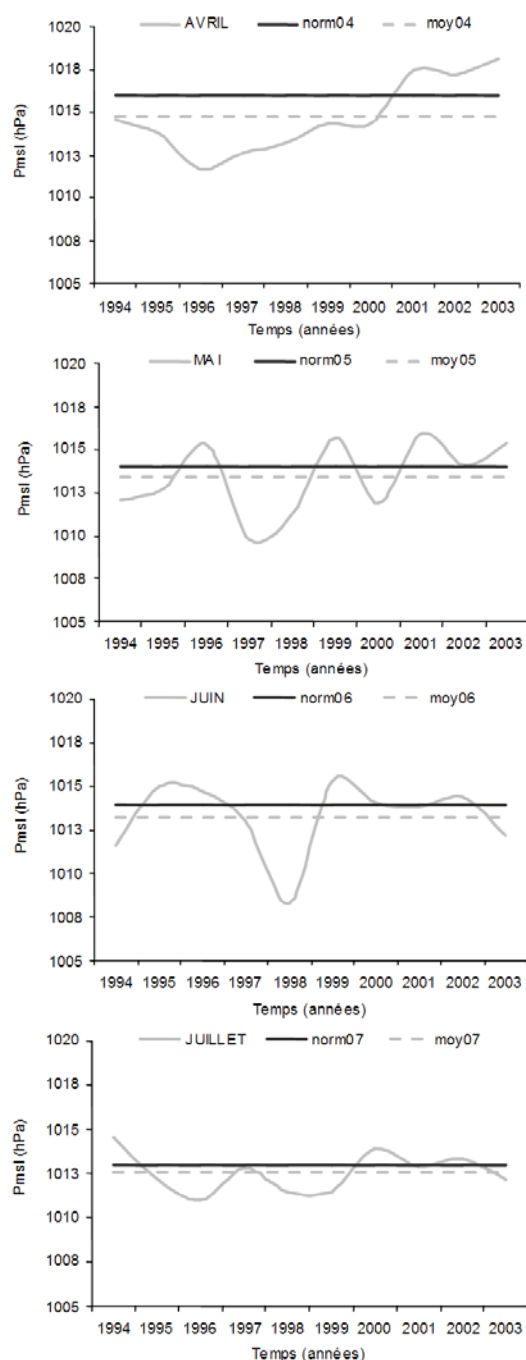


Figure 2.38 : Comparaison entre Psta et Pmsl (hPa) d'avril à septembre 1994 à 2003

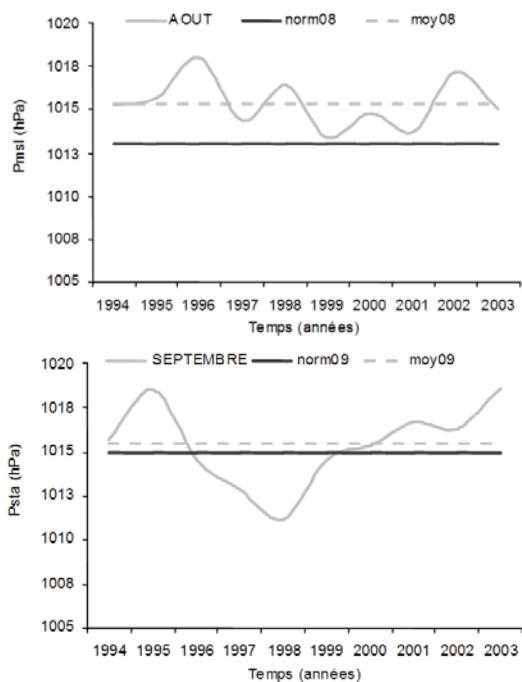


Figure 2.39 : Distribution de la Pmsl (hPa) d'avril à septembre 1994 à 2003

Juin 1999 enregistre les meilleures valeurs. Vient juillet qui apporte des valeurs moyennes plus ou moins stables d'une année sur l'autre. En revanche dans ce cas, la moyenne de la décennie à l'étude est inférieure à la normale climatique de la période 1971-2000. 1996, 1998 et 1999 tirent cette moyenne vers le bas. En août, la pression moyenne est très légèrement supérieure à la normale. Elle est de façon générale supérieure à la pression moyenne de juillet. Les années 1996, 1998 et 2002 présentent des pressions moyennes particulièrement hautes. En revanche, la période de 1999 à 2001 correspond à des années de plus basse pression pour ce mois-ci. Les autres années se situent dans la moyenne. Septembre montre une distribution assez différente de ce que nous avons pu noter jusqu'à présent. La moyenne de la période 1994-2003 est inférieure à la moyenne de saison, signifiant que durant cette décennie la pression moyenne à la station a connu une chute. Le maximum du creux a lieu en 1998. On peut également dire que de 1996 à 2000, les pressions furent généralement basses. Elles tendent à remonter à partir de l'année 2001.

En conclusion, au printemps (Figure 2.40) la pressions durant cette décennie fut très légèrement au-dessus de la normale saisonnière, marquée par des épisodes bien en deçà de la normale comme en 1997 et 1998 qui font de ces années, des années significativement différentes des autres ( $H_{obs}$  de KW = 41.368,  $H_{crit}$  = 16.919,  $\alpha$  = 0.05) et d'autres bien au-delà comme en 1999 (grâce à mai et juin), 2001 (grâce à avril et mai) et 2002 (avec avril). L'été est globalement plus homogène d'une année sur l'autre avec toutefois les années 1997 à 2001 plus creuses.

La moyenne générale de cette saison est inférieure à la normale de saison.

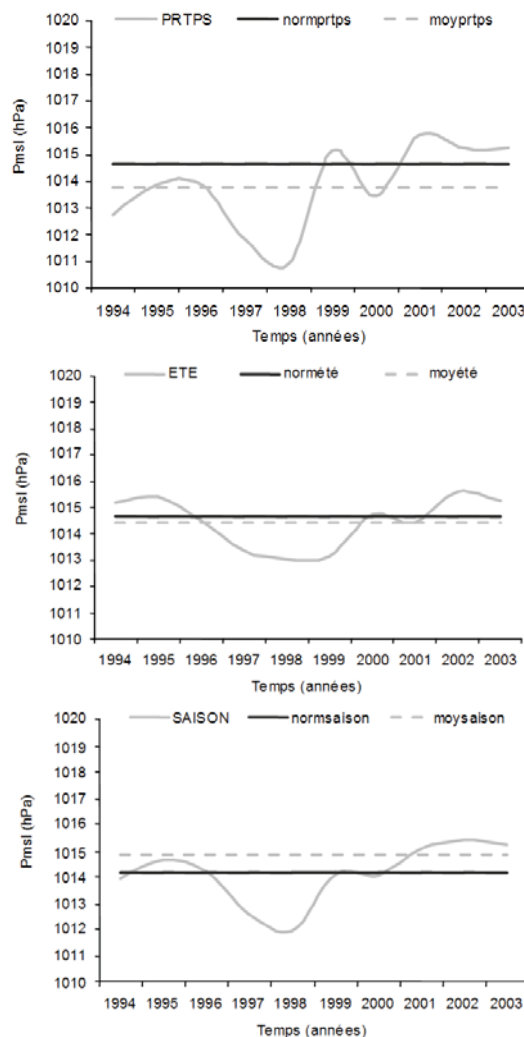


Figure 2.40 : Distribution de la Pmsl (hPa) au printemps, en été et durant la saison complète entre 1994 et 2003

#### v. Conditions de vent

##### ✓ Vitesse du vent

Accordons maintenant notre attention au vent en termes de vitesse et de direction. L'observation de la direction du vent permet d'évaluer la position approximative du centre de basse pression. Les données d'observation issues de mesures faites à proximité du sol sont analysées. Il nous intéresse de déterminer s'il existe des différences importantes entre les années, mensuellement ou encore au niveau de la saison.

VITESSE DU VENT (m/s)	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moyenne 94-03	Normale 71-00
AVRIL	4.3	4.4	4.2	4.1	4.0	4.8	5.3	4.9	4.9	4.6	4.6	4.4
MAI	4.0	3.9	4.2	4.9	3.6	4.2	4.6	4.3	5.6	3.9	4.3	3.9
JUN	3.1	3.5	3.3	3.6	3.9	3.8	4.4	3.9	4.2	3.8	3.8	3.7
JUILLET	3.2	3.4	4.2	3.5	3.5	4.2	3.9	4.4	4.6	4.6	4.0	3.4
AOUT	3.0	3.3	3.0	3.1	2.9	3.6	4.0	4.2	3.9	4.1	3.5	3.1
SEPT	3.2	3.2	3.8	3.7	3.3	3.7	4.1	3.9	4.1	4.3	3.7	3.4
PRIFS	3.6	4.0	3.9	4.3	3.9	4.3	4.8	4.5	4.8	4.2	4.2	4.6
ETE	3.1	3.3	3.7	3.4	3.2	3.9	4.0	4.2	4.2	4.4	3.7	3.3
SAIS	3.5	3.6	3.8	3.9	3.6	4.1	4.4	4.3	4.5	4.3	4.0	3.7

Tableau 2.11 : Vitesses de vent mensuelles moyennes par année à l'étude

Le Tableau 2.11 et la Figure 2.41 montrent que les moyennes mensuelles de la période étudiée sont toujours supérieures à la normale de saison. Juillet est le mois durant lequel l'écart avec la normale est le plus grand :  $0.6 \text{ m s}^{-1}$  ( $2.0 \text{ km h}^{-1}$ ). Ensuite mai et août présentent  $0.4 \text{ m s}^{-1}$  de différence également ( $1.6 \text{ km h}^{-1}$ ). Nous pouvons aussi voir que le mois d'août est le mois le moins venteux et qu'avril est le plus venteux.

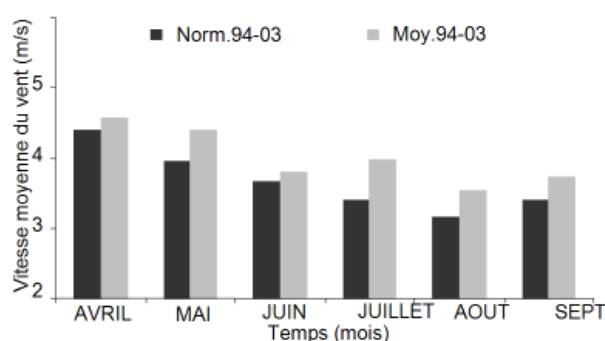
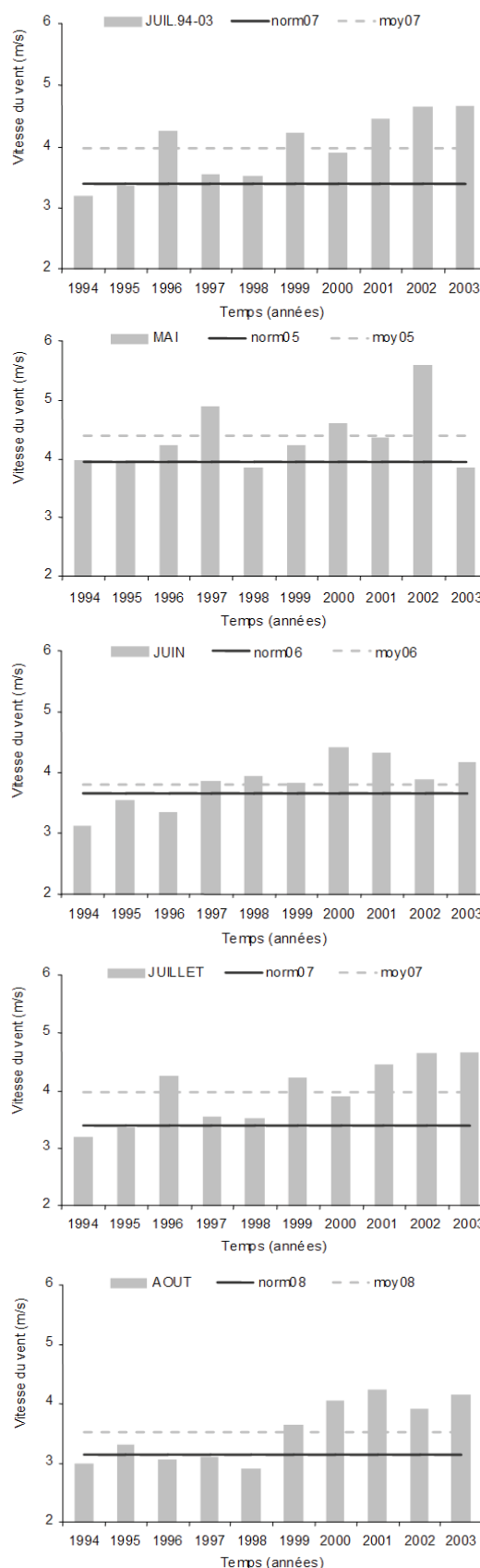


Figure 2.41 : Représentation graphique de la moyenne mensuelle de la vitesse du vent ( $\text{m.s}^{-1}$ ) d'avril à septembre pour la période 1994-2003 comparativement à la normale 1971-2000

La Figure 2.42 offre un aperçu des conditions mensuelles moyennes du vent entre 1994 et 2003. La vitesse du vent tend à augmenter au fur et à mesure de la période étudiée. Le même phénomène a été observé pour la température. Avril et mai sont les deux mois les plus venteux avec des moyennes mensuelles se situant entre  $4.6$  et  $4.4 \text{ m s}^{-1}$  contre  $4.4$  et  $3.9 \text{ m s}^{-1}$  respectivement en ce qui concerne les normales de ces deux mois. De façon plus spécifique, en avril, il est possible de distinguer deux catégories d'années. La première concerne la fin des années 90' et la seconde le début des années 00'. La seconde catégorie commence en 1999 et présente des situations particulièrement venteuses. L'année 2000 domine toutes les autres avec une moyenne de  $5.3 \text{ m s}^{-1}$  et notamment une pointe de vent à plus de  $10 \text{ m s}^{-1}$  le 05/04. L'année la moins venteuse est 1998.

En mai, l'année 2002 tire vraiment la moyenne vers le haut. Elle y est de  $0.5 \text{ m s}^{-1}$  plus forte que la normale. L'année la moins venteuse est de nouveau 1998. Le début des années 00' ainsi que l'année 1997 sont relativement venteuses. En juin, la vitesse moyenne tombe ainsi que la normale. Ce mois est moins venteux et les écarts avec la normale sont moindres. Les années 00' sont de nouveau plus venteuses mis à part 2002. 1994 est l'année la moins venteuse.



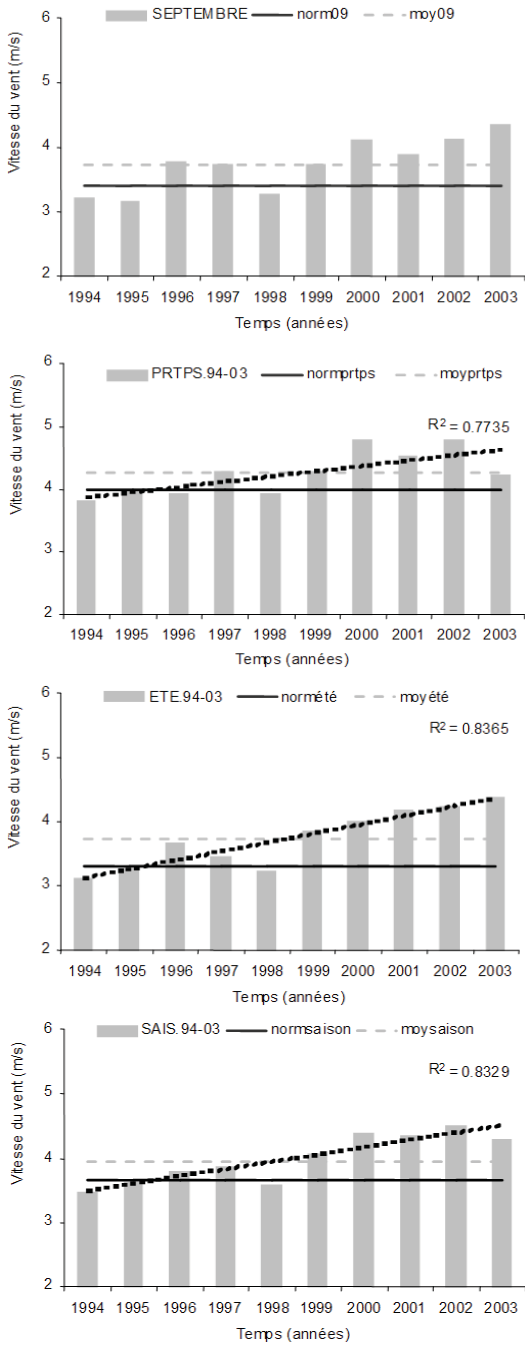


Figure 2.42 : Distribution de la vitesse du vent en m/s d'avril à septembre 1994 à 2003 ainsi que selon les saisons

La moyenne de juillet se trouve de nouveau bien supérieure à la normale. La tendance observée en avril est de nouveau très claire. L'augmentation de la vitesse du vent est très nette avec les années. A partir de l'année 1999, l'augmentation de la vitesse du vent d'année en année est bien marquée. Le profil est semblable en août à la différence près que les vitesses moyennes sont en moyenne plus faibles. 1998 est l'année la moins venteuse, 2001 la plus venteuse. Le mois de septembre montre moins de fluctuations d'année en année et notamment entre les années 2000.

En conclusion, le printemps est plus venteux que l'été (Figure 2.42), ce qui est la situation attendue. L'année 1998 est la moins venteuse, alors que 2000 et l'ensemble des années 00' sont au contraire très venteuses. En été une année se tient vraiment à l'écart des autres, 1998, les autres années montrent respectivement une augmentation significative de la vitesse du vent d'année en année ( $r^2 = 0.8365$ ). Nous pouvons dire que nous enregistrons réellement une tendance à l'augmentation de la vélocité du vent au cours de la période 1994-2003 par rapport à la normale 1971-2000.

✓ *Provenance du vent*

Le Tableau 2.12 fournit un aperçu de ce que fut la direction moyenne du vent d'avril à septembre pendant la période 1994-2003. Le Nord se situe à 0° ou 360°. Le Sud est à 180°.

DIRECTION DU VENT (°)	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	Moyenne 94-03	Normale 71-00
AVRIL	182.0	200.7	170.4	188.2	159.9	190.1	149.5	185.5	197.2	164.4	178.8	0.0
MAI	175.0	184.1	193.7	210.8	161.3	183.2	167.6	186.8	211.3	129.1	180.3	225.0
JUIN	182.7	164.8	161.3	173.5	172.8	195.3	183.9	212.9	182.3	187.8	181.7	225.0
JUILLET	172.0	185.1	202.2	210.2	220.6	222.8	204.0	203.2	209.0	202.5	203.2	225.0
AOUT	186.5	169.8	191.5	190.2	166.2	197.4	200.3	183.6	205.4	182.9	187.4	225.0
SEPTEMBRE	165.8	177.8	141.1	199.9	172.5	165.8	186.8	156.8	188.3	170.3	172.5	225.0
PRTPS	179.9	183.2	175.1	190.8	164.7	189.5	167.0	195.1	196.9	160.5	180.3	150.0
ETE	174.8	177.6	178.3	200.1	186.5	195.3	197.0	181.2	200.9	185.2	187.7	225.0
SAIS	177.3	180.4	176.7	195.5	173.6	192.4	182.0	188.1	198.9	172.8	184.0	187.5

Tableau 2.12 : Direction mensuelle moyenne du vent par année à l'étude

La normale de chacun des mois est que le vent provient du SW à part en avril où il semble venir du Nord. Les moyennes que nous avons globalement sont beaucoup plus de composante Sud en revanche. Remarquons qu'il y a une certaine alternance d'un mois sur l'autre entre le SW et le SE. Les années 1998, 2000 et 2003 offrent peut être une plus grande occurrence de vent venant de l'Est. La situation est semblable en mai, en août et en septembre. La représentation graphique par secteur proposée à la Figure 2.43 permet d'apprécier sans erreur cette part dominante des vents venant du Sud au Sud Ouest et cela quelque soit le mois considéré ou la saison. Cette part est d'autant plus dominante en juillet mais disons que de mai à août, ce secteur représente la provenance de la majorité des vents durant la période étudiée (1994-2003). Les vents provenant du quart Nord Est bien que beaucoup moins nombreux, ne sont toutefois pas à négliger. De façon surprenante en été, et ceci surtout à cause du mois d'août, ils prennent le pas sur les vents provenant du quart Sud Est.

La série de graphiques de la Figure 2.44, complète la lecture de la Figure 2.43. Nous trouvons sur chaque graphique, le temps selon l'axe des x et la fréquence relative en pourcent du nombre de jours durant lequel l'année que représente le graphique a connu des vents provenant d'une des 4 principales orientations proposées selon l'axe des ordonnées. La provenance Sud à Ouest (en jaune) est la mieux représentée dans tous les cas de figure, que ce soit d'année en année ou pendant les



mois de printemps ou d'été. La classe la moins bien représentée est celle de l'Ouest au Nord (en bleu) et plus particulièrement durant l'année 1994 durant laquelle elle est quasi inexistante.



Figure 2.43 : Distribution mensuelle et saisonnière totale des directions dominantes du vent (NE, SE, SW, NW) à Dorval sur la période 1994 - 2002 (3)

Le printemps présente un plus grand nombre de cas de vents venant de l'Est au Sud (en vert) que l'été. Cette différence est moins bien marquée en 1996 et 1997, mais l'est plus fortement en 1999. Le nombre de jours de vent venant de l'Est au Sud est supérieur à la moyenne en avril 1996 et en juin mais également en juillet et en septembre. En 1997, leur nombre est supérieur à la moyenne en avril mais en revanche bien inférieur en mai et juin surtout et de nouveau bien au-delà de la moyenne mensuelle de juillet. Une majorité du temps par ailleurs, les journées de vent du Nord à l'Est (en orange) sont de

façon surprenante, plus nombreuses durant les étés que pendant les printemps à part en 1997, 1998 et 2000 qui les comptabilisent plutôt en juin en 1997 ou en mai en 1998 et 2000. Le détail de ces informations est présenté dans les Figures 2.45 à 2.48.

Etant donné que le vent permet le transport du pollen, il est intéressant de connaître plus précisément ce qu'il se passe pendant la période d'émission du pollen dans l'air. Nous savons qu'en août les vents du quart SW sont dominants à Montréal. Dans ce contexte là, nous nous trouvons dans la normale de saison.

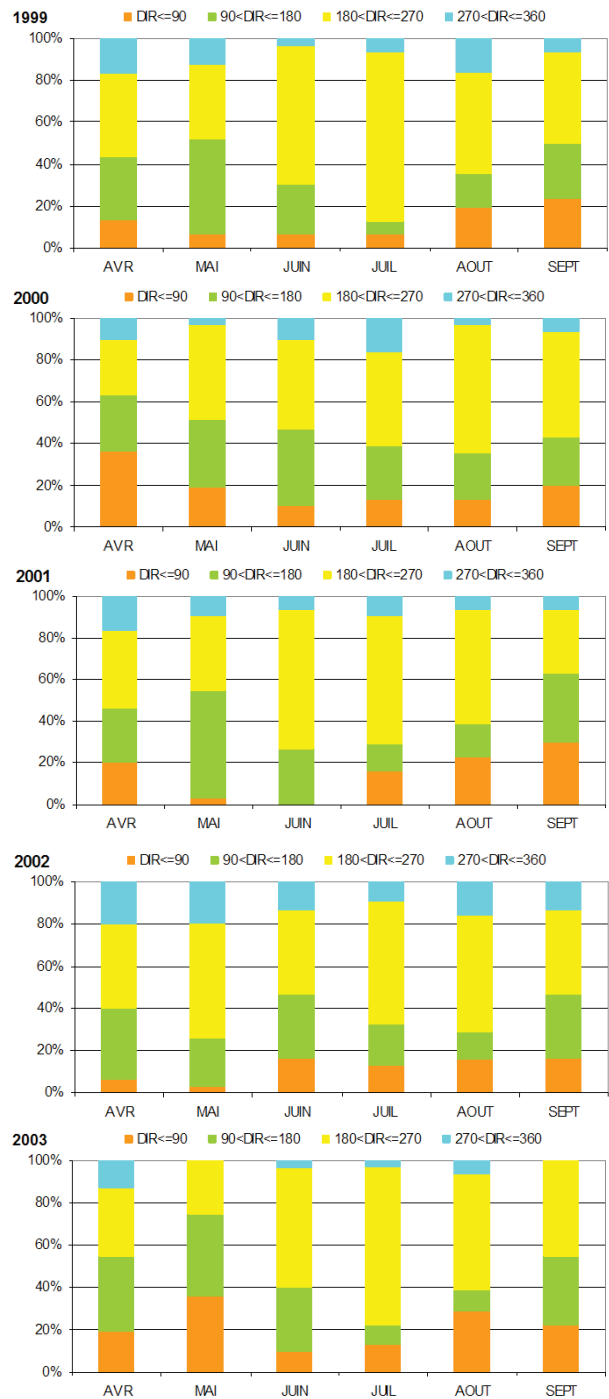
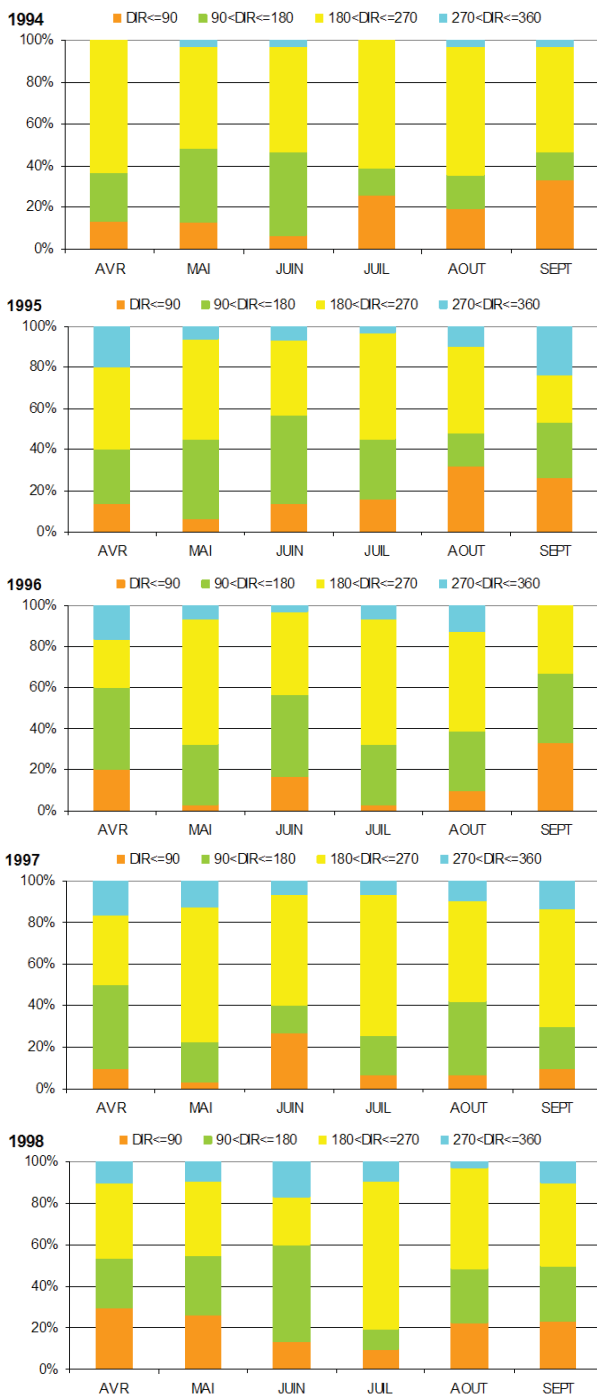


Figure 2.44 : Distribution mensuelle par année à l'étude du nombre de jours compté pour chaque catégorie de classe de provenance du vent (NE, SE, SW, NW) à Dorval de 1994 à 2003 en pourcentage

La seconde provenance d'importance est celle de l'Est avec certaines années comme en 1994, 1995, 1999, 2002 et de façon très marquée 2003 présentant une relativement forte occurrence de vents du NE et d'autres années telles 1996, 1997, 1998 et 2000 de vents provenant du SE. En septembre, la distribution des provenances du vent est plus fluctuante d'une année sur l'autre. On observe moins de régularité qu'en août. Cependant dans 9 cas sur 10, les

vents du SW dominant. La seule année pendant laquelle ce n'est pas le cas est 2001. La distribution du nombre de jours par catégorie de provenance du vent est plus équitable en septembre qu'elle ne l'est en août.

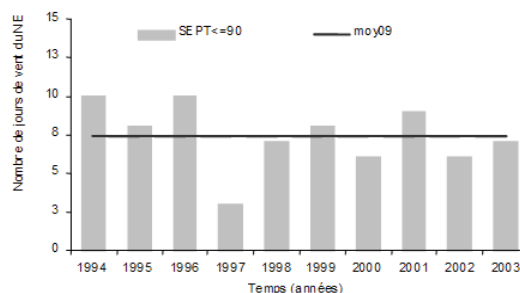
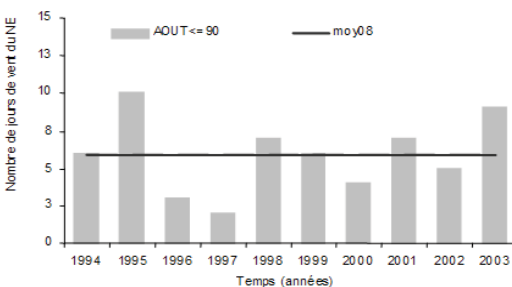
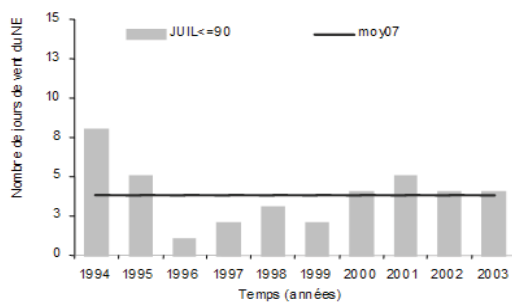
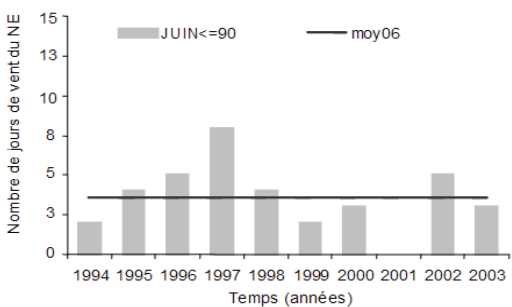
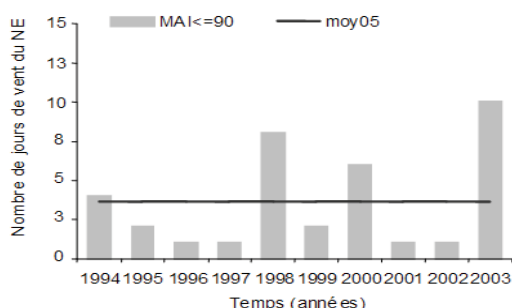
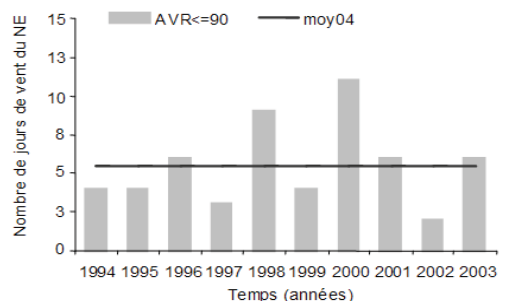


Figure 2.45: Distribution mensuelle du nombre de jours venteux du Nord à l'Est entre 1994 et 2003

L'analyse des résultats des Tableaux 2.13 et 2.14 révèle qu'il n'existe pas de différence statistique significative de la distribution du nombre de jours de chaque classe de provenance de vent entre les dix années à l'étude.

AOÛT	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
DIR<=90	6	10	3	2	7	6	4	7	5	9
90<DIR<=180	5	5	9	11	8	5	7	5	4	3
180<DIR<=270	19	13	15	15	15	15	19	17	17	17
270<DIR<=360	1	3	4	3	1	5	1	2	5	2

Tableau 2.13 : Nombre de jours par an du mois d'août durant lesquels le vent provient d'une des 4 directions principales (NS, SE, SW et NW).

L'observation du graphique de la Figure 2.49 confirme la dominance des vents du SW d'année en année ainsi que le fait qu'il existe une légère tendance à ce que le nombre de jours affectés par cette direction augmente au fil du temps. Les années 1994 et 2000 sont toutes deux exceptionnelles avec près de 2/3 du mois sous cette influence. L'année 1995 est la moins influencée par cette direction mais est beaucoup plus souvent sous l'influence des vents du NE. Ces vents du NE sont d'ailleurs très peu représentés en 1996 et 1997 au profit de vents du SE. Toutefois, la tendance des vents du NE semble légèrement à la hausse sur la fin de la période avec une augmentation importante en 2003 au dépend de ceux du NW. Il semble que la distribution des jours de vents du NE et de ceux du SE soit alternée d'année en année, avec le fait qu'à partir de l'année 2001 la tendance des vents du SE diminue. Les vents du NW sont bien moins bien représentés (moins de 5 jours par mois) mais ne sont tout de même pas négligeables en 1999, 2002 et dans une moindre mesure en 1996.

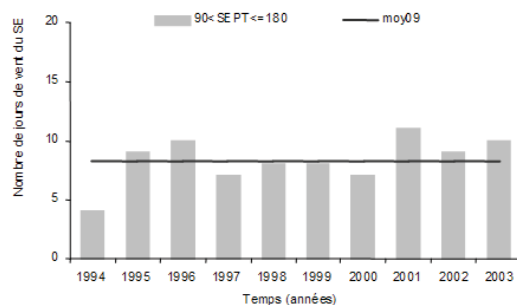
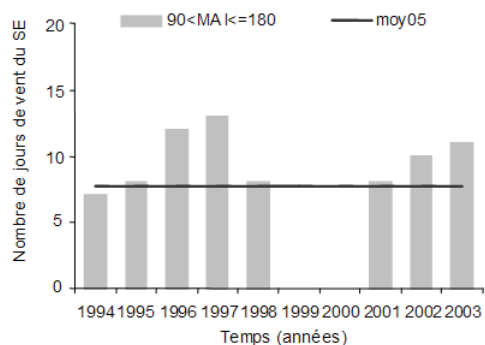
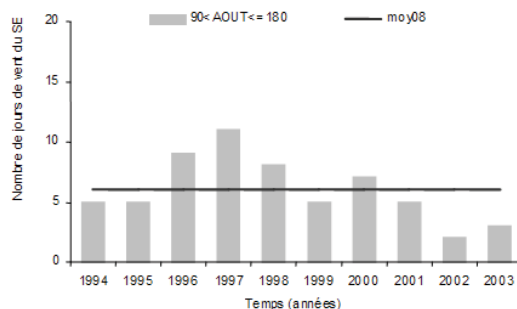
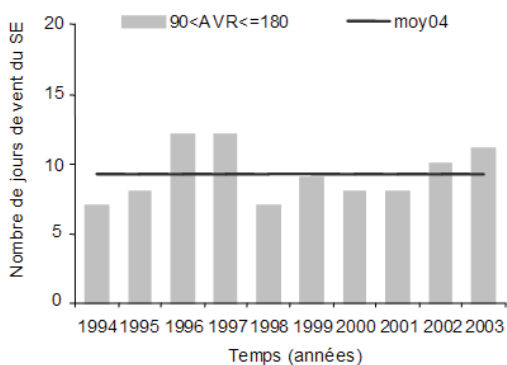
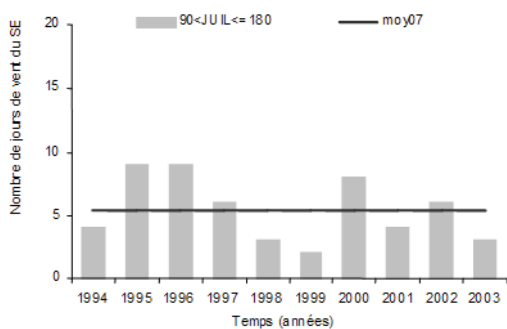
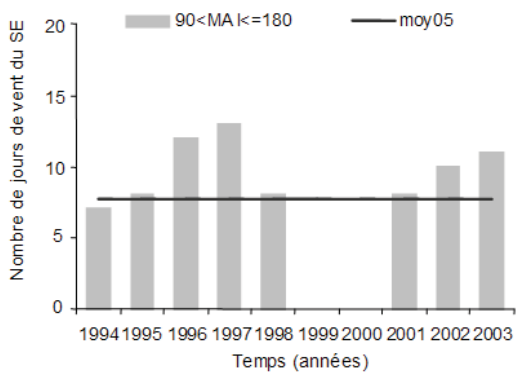
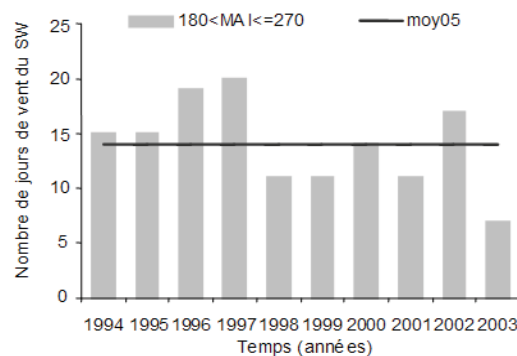
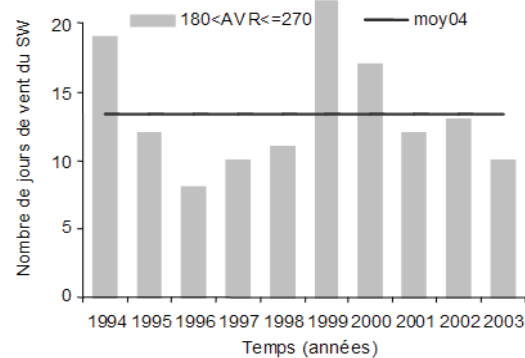


Figure 2.46 : Distribution mensuelle du nombre de jours venteux de l'Est au Sud entre 1994 et 2003



L'observation de la Figure 2.50 confirme le fait que même si la direction du SW est dominante dans la plupart des cas, elle l'est moins qu'en août. Elle est fortement représentée en 1994, 1997, 2000 et 2003 à chaque fois au dépend d'une des provenances du Nord.



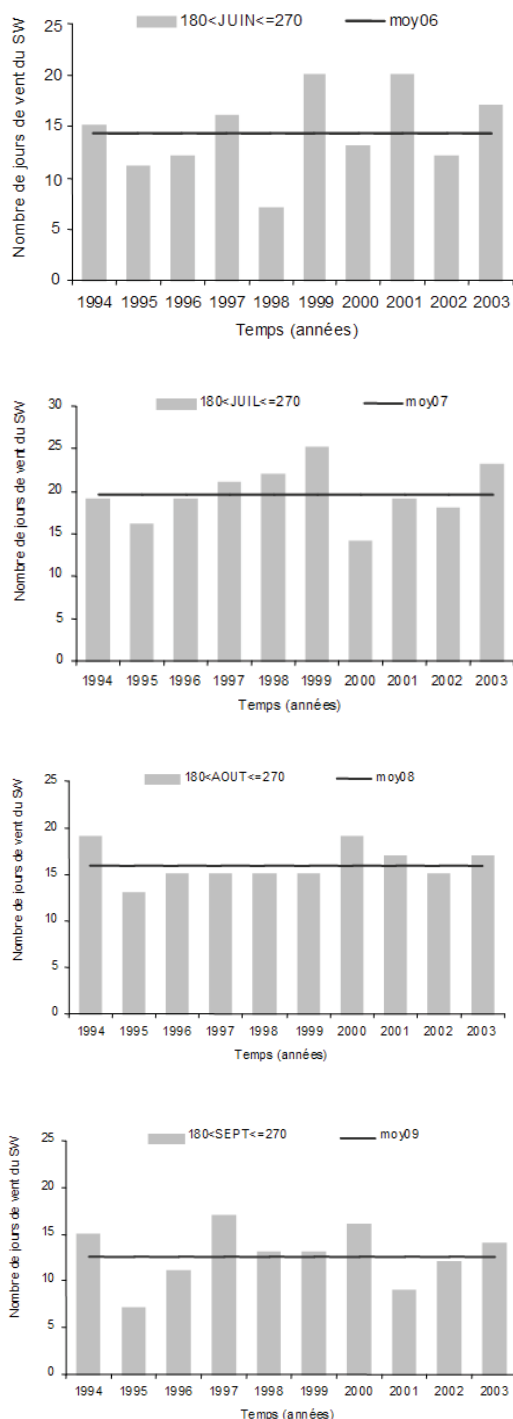
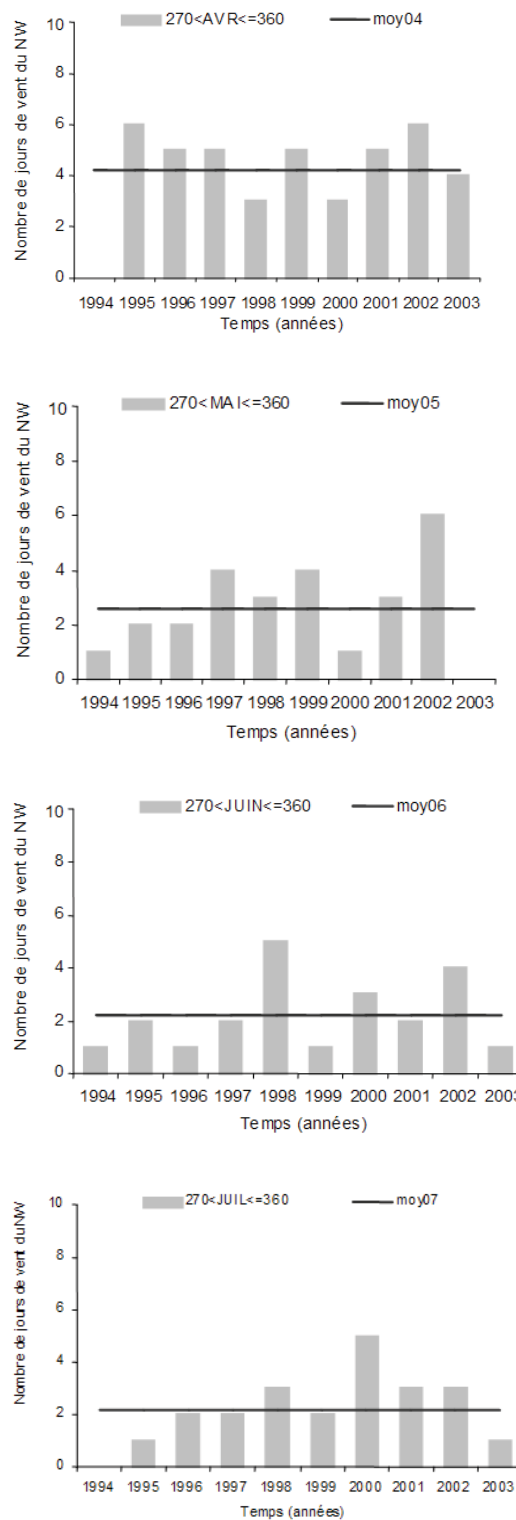


Figure 2.47 : Distribution mensuelle du nombre de jours venteux du Sud à l'Ouest entre 1994 et 2003

Les vents provenant de l'Est qu'ils soient du Nord ou du Sud co-varient en septembre et sont représentés dans des proportions assez similaires chaque année à part en 1994, 1997 et 2002, années pendant lesquelles en 1997 et 2000 les vents de Sud sont dominants. Considérant finalement la saison pollinique, la Figure 2.51 présente les roses des vents annuelles des saisons polliniques d'ambroisie. Le Tableau 2.15 qui accompagne ces graphes ne laisse pas apparaître de différence statistiquement significative dans

la distribution du nombre de journées entre les classes de direction d'une année sur l'autre.





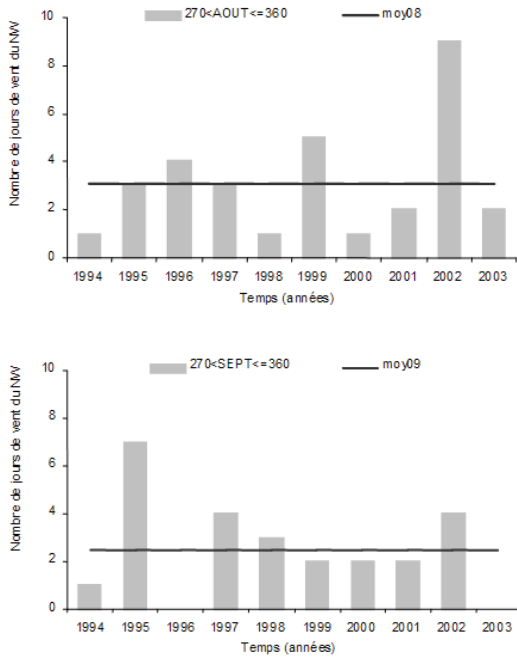


Figure 2.48 : Distribution mensuelle du nombre de jours venteux de l'Ouest au Nord entre 1994 et 2003

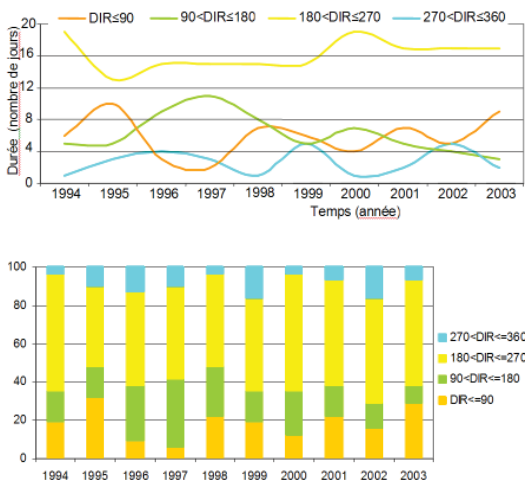


Figure 2.49 : Distribution du nombre de jours par classe de direction principale du vent en août à Dorval entre 1994 et 2003

Nous en déduisons que chaque année, à part en 1997, connaît un certain nombre de jours non négligeable pendant lesquels le vent vient du NNE. Sinon, deux catégories d'années s'organisent autour des vents de l'Ouest. Il y a celles dont la majorité des journées se caractérisent par des vents de l'WSW comme c'est le cas de 1994, 1998, 2000 et 2003 et celles dont la majorité des vents proviennent du SSW comme en 2001, 2002. Les autres années sont entre les deux avec une fréquence de l'une ou l'autre direction à peu près semblable.

SEPTEMBRE	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
DIR<=90	10	8	10	3	7	7	6	9	5	7.0
90<DIR<=180	4	8	10	6	8	8	7	10	9	10.0
180<DIR<=270	15	7	10	17	12	13	15	9	12	14.0
270<DIR<=360	1	7	0	4	3	2	2	2	4	0.0

Tableau 2.14 : Nombre de jours par an du mois de septembre durant lesquels le vent provient d'une des 4 directions principales (NS, SE, SW et NW)

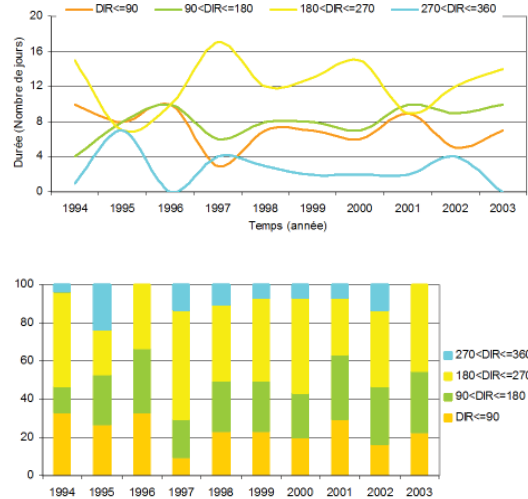


Figure 2.50 : Distribution du nombre de jours par classe de direction principale du vent en septembre à Dorval entre 1994 et 2003

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
<=45	15	17	7	1	14	11	8	13	9	11
<=90	1	1	6	4	0	2	2	3	1	5
<=135	5	1	8	7	6	7	2	1	3	3
<=180	4	12	11	10	10	6	12	14	10	10
<=225	11	8	12	15	10	13	12	16	19	9
<=270	23	12	13	17	17	15	22	10	10	21
<=315	1	9	4	7	4	7	2	1	7	2
<=360	1	1	0	0	0	0	1	3	2	0

Tableau 2.15 : Nombre de jours par an des mois d'août et septembre durant lesquels le vent provient d'une des 8 directions

### 3.2. Analyse des types de temps

Le dernier paramètre d'intérêt concerne les types de temps élaborés et gracieusement fournis par Sheridan (2002). Ces données sont accessibles gratuitement sur le site internet <http://sheridan.geog.kent.edu/ssc.html>. Ces types de temps synoptiques sont issus du schéma appelé par son auteur: Spatial Synoptic Classification (SSC). Cette SSC prend en considération les données météorologiques de stations de surface et permet la classification de chaque journée selon un ou plusieurs types de temps prédéfinis. Ce schéma intègre le fait que les caractéristiques du temps changent de station en station, de jour en jour. Concernant Montréal, cette classification est disponible depuis le 01/01/1953 jusqu'au 31/12/2003, ce qui en fait une base de données extrêmement intéressante pour caractériser la période que nous étudions, en comparaison d'autres plus anciennes. Ce paramètre que nous appelons « type de temps » (TT) est donc un paramètre de synthèse. A l'Annexe 2.5 on trouve une description de chaque type de temps disponible et de ses caractéristiques. Des numéros

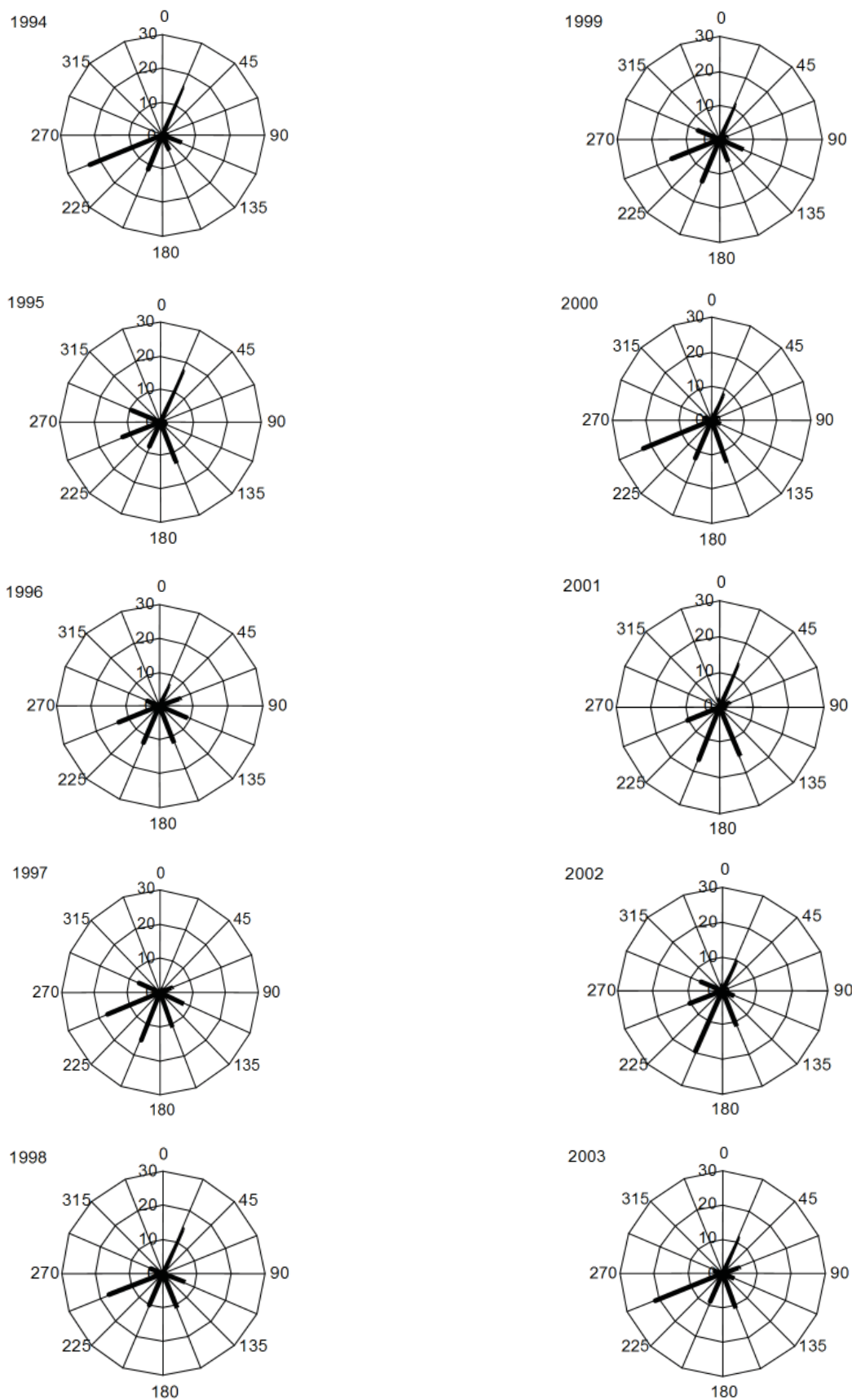


Figure 2.51 : Distribution du nombre de jours par classe de direction du vent en août et septembre à Dorval entre 1994 et 2003

leur ont été attribués afin de faciliter l'analyse.

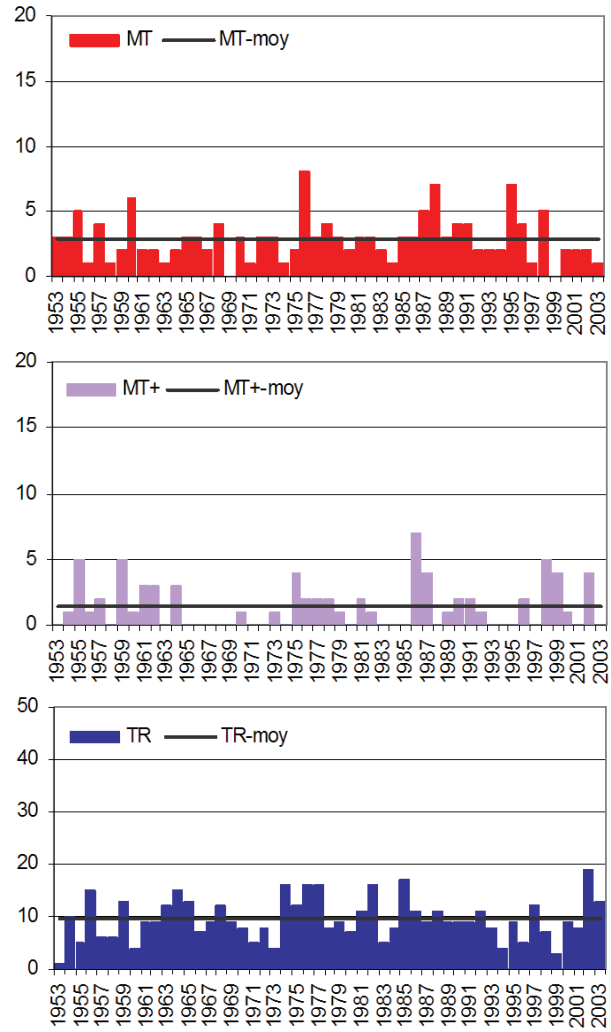
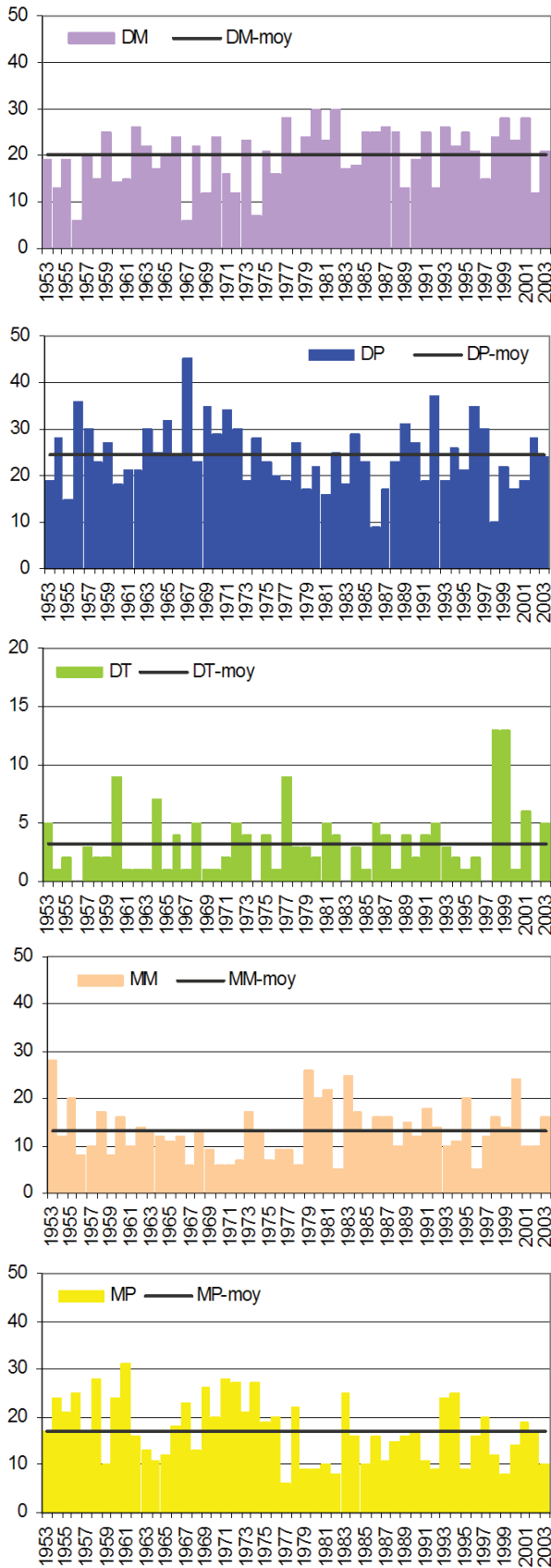


Figure 2.52: Distribution printanière du nombre de jour sous un type de temps ou un autre entre 1953 et 2003

Les Figures 2.52 et 2.53 présentent le nombre de jours affecté par tel ou tel type de temps pendant le printemps et l'été de 1953 à 2003, soit sur une période de 50 années. Le nombre moyen de jours est représenté pour la période sur chacun des graphiques et cette moyenne peut être considérée comme étant une normale vue la durée de la période à partir de laquelle elle a été calculée. Certains types de temps sont plus fréquents pendant une saison que d'autres (Tableaux A2.2-48 et A2.2-49). C'est le cas des types polaire sec (TT3), tempéré sec (TT1) et polaire humide (TT5) tous mieux représentés au printemps que les types de temps plus humides et plus chauds plus fréquents pendant la saison estivale comme le tropical humide (TT6), le tempéré humide (TT4) ou tempéré sec (TT1).

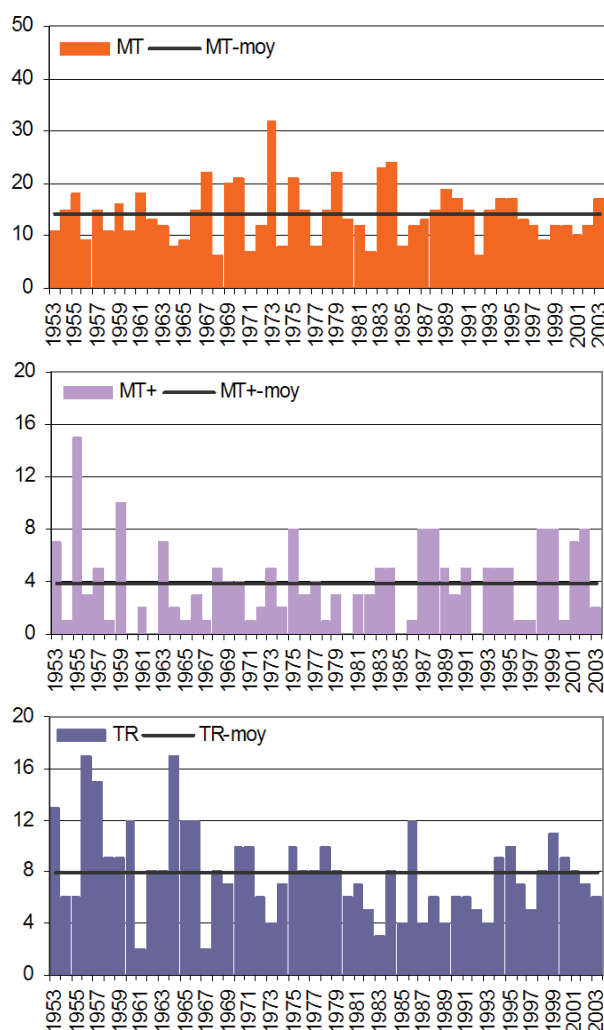
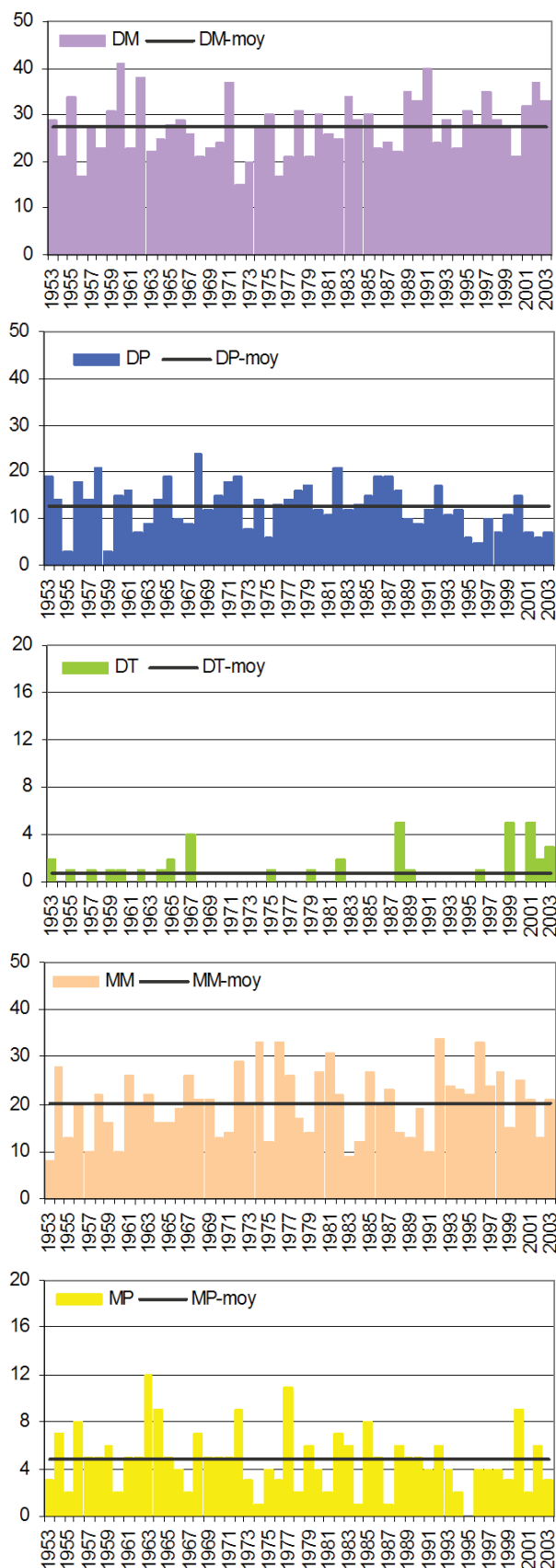


Figure 2.53 : Distribution estivale du nombre de jour sous un type de temps ou un autre entre 1953 et 2003

Ainsi en été, le type de temps le plus fréquent et il en est de même pendant la période 1953-2003, est le type 1 « tempéré sec » dans 32% des cas. Il est suivi du type 4 « tempéré humide » 25% du temps et finalement du type 6 dans 14% des cas. Il existe aussi certaines tendances entre la période 1953-2003 et la période d'étude. Ainsi au printemps tout comme en été le type 1 a tendance à augmenter récemment, de même que le type 3 et le type 66 et de façon moins marquée au printemps mais plus significatif en été le type 4. Les types 2, 5 et 7 quant à eux semblent plutôt diminuer. La tendance est à la baisse de la fréquence d'occurrence des types de temps d'origine plus froide au profit des types de temps plus chauds. En effet les types 2 et 5 sont respectivement associés à des types de temps « polaire sec » et « polaire humide ».

La Figure 2.54 permet de comparer la distribution des types de temps de jour en jour au cours de chaque saison pollinique étudiée. Une petite analyse de ces résultats semble laisser apparaître une augmentation de la variabilité d'année en année. Ainsi, à partir du milieu de

la période à l'étude, l'alternance des journées de types de temps différents est plus grande et plus fréquente qu'au préalable et caractérise tout particulièrement les années 1998, 2000, 2001 et 2003. Les autres années montrent des périodes de persistance plus longue de certains types.

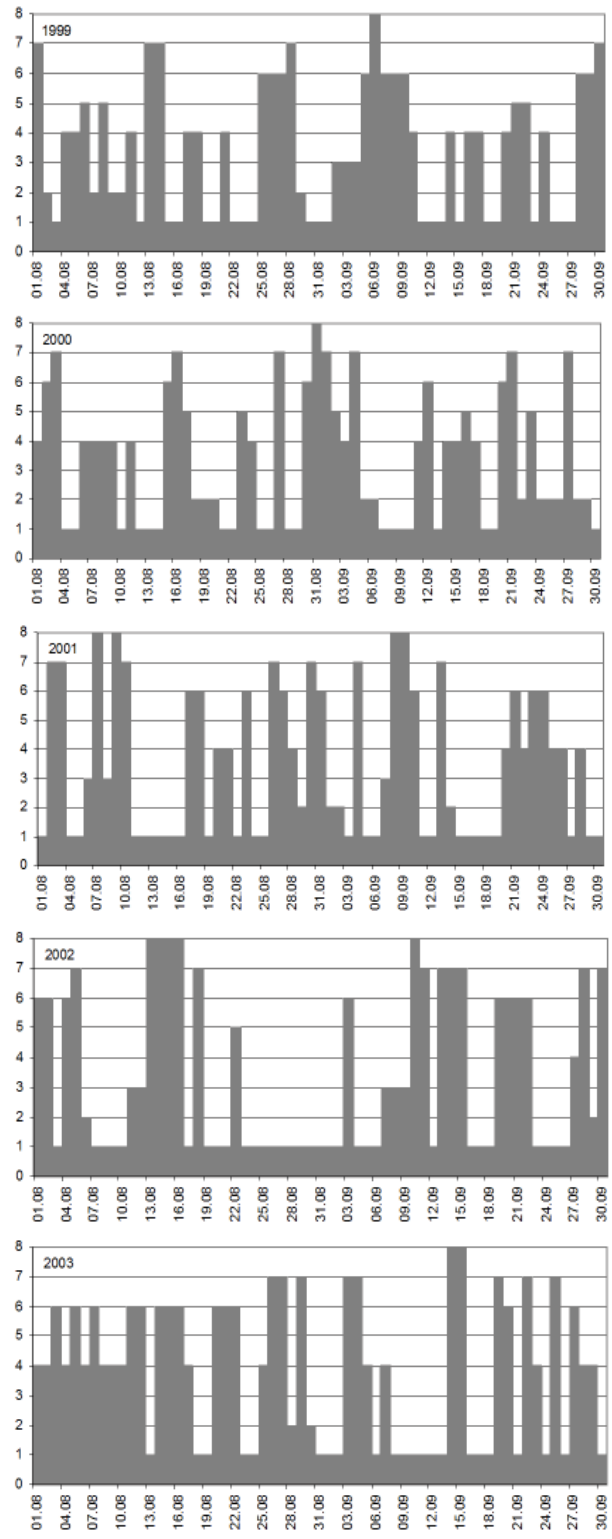
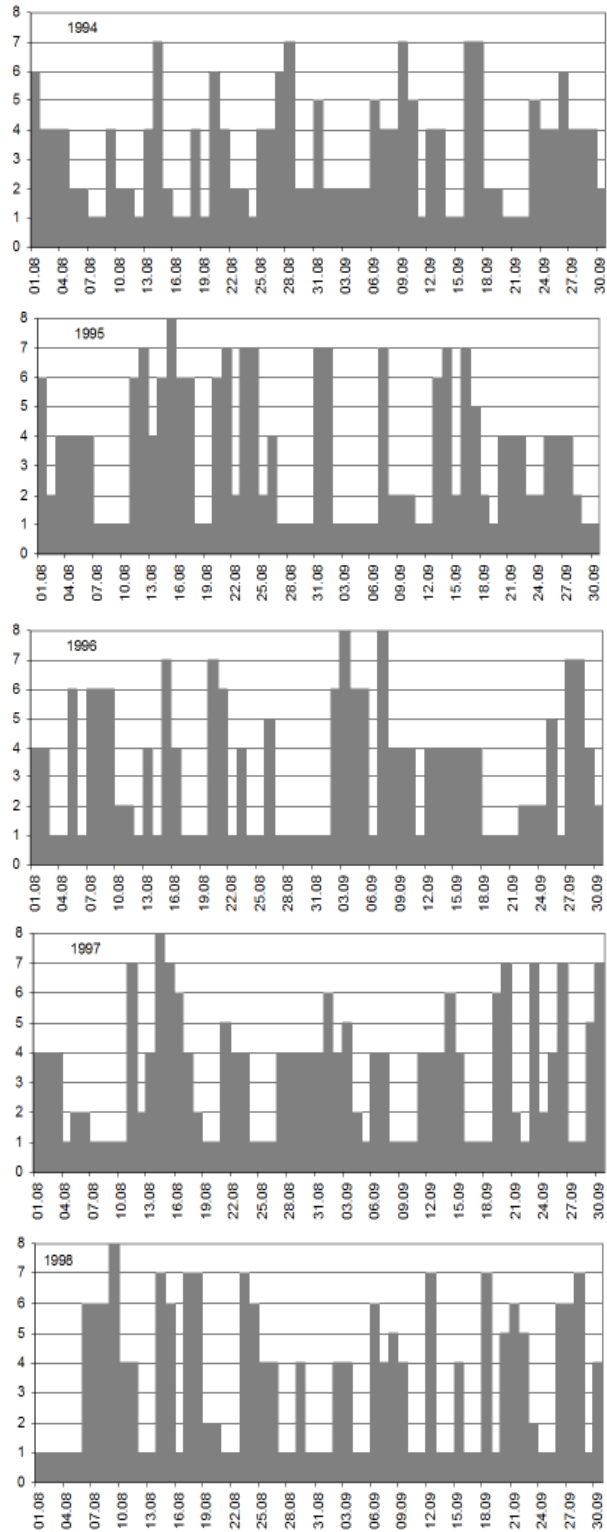


Figure 2.54: Distribution mensuelle des type de temps en août et septembre de chaque année entre 1994 et 2003 (le chiffre 8 signifie une absence de type de temps)

L'été 1994 se caractérise par une bonne représentation du types 4 (tempéré humide) et une représentation anormalement élevée du type 2 (polaire sec) en plein cœur de la saison de l'ambroisie (du 28/08 au 06/09) avec également présence de journées de type 5 qui est



également un type polaire mais humide cette fois. Avant et après cette période froide, nous notons une alternance de journées de type 4, 2, 1, 7 mais rarement 6. Il s'agit d'un été manifestement un peu atypique. L'été 1995 se caractérise quant à lui par une alternance de périodes influencées par le type 6 du Sud (10/08 au 18/08) et d'autres plus froides avec le type 2 (du 22/08 au 27/08 et du 07/09 au 10/09). Sur la fin de septembre, apparaît de nouveau une alternance de type 4 et type 6. L'été 1996 présente en toile de fond des journées de type 1 (tempéré sec) avec alternance de journées de type 6 et de transition. Nous notons une période persistante de type 4 (tempéré humide) du 08 au 18/09, puis la fin de l'été est marquée par une période un peu plus froide. 1997 présente le plus grand nombre d'épisodes de type 4 que précédemment alternant avec les journées de type 1 et d'autres de type 6 et de transition. L'été 1998, se caractérise par une forte variabilité et alternance entre les journées de type 4, 1, 6 et 7. Les changements sont plus fréquents que précédemment avec cette fois, trois chutes notables de la température entre le 18/08 et le 20/08, entre le 07/09 et le 10/09 et entre le 20/09 et le 22/09. L'été 1999 est marqué par une période plus fraîche en début de période suivie d'une autre venant du Sud relativement longue (25/08 au 10/09) interrompue au milieu les 28 et 29/08 par un changement de temps. La situation redevient plus « normale » après le 11/09 pour se réchauffer de nouveau fin septembre. L'année 2000 est marquée par du temps plutôt changeant (toutes les semaines épisode de transition) et présence à 5 occasions de journées de type 5 qui est le type polaire humide ainsi que de séries de journées de type 2. L'été 2001 connaît aussi une très forte alternance de temps divers mais de manière globale moins froid que 2000 à part entre le 29/08 et le 02/09. 2002 se caractérise par une moins grande variabilité, notamment due à la persistance pendant presque 3 semaines du type de temps 1. Juste avant cette longue période, cet été a connu une persistance quasi anormale de type de temps 6+ donc anormalement chaud et humide. D'ailleurs le rapport 2002 sur la Qualité de l'Air à Montréal indique que 65% des 23 à 30 jours de mauvaise qualité de l'air ont eu lieu pendant la période estivale. L'été fut particulièrement beau et chaud mais propice à la formation de smog. Ainsi, la ville de Montréal a connu pour la première fois à cette occasion un épisode de smog s'étalant sur 4 journées consécutives, du 11 au 14 août pendant l'épisode de type de temps 6+. En revanche et de façon surprenante c'est au centre-ville que le nombre de journées de bonne qualité de l'air a été relevé avec 257 jours (très faibles quantités d'ozone mesurées au sol en CV). Au centre-ville, les particules fines (PM2.5) mesurées ne cessent d'augmenter ainsi qu'à l'Est et dans l'Ouest. Ainsi cette année-là, le maximum est atteint dans l'Ouest puis au CV puis enfin dans l'Est. En 2001, l'inverse avait été observé avec le maximum dans l'Est puis au CV et enfin dans l'Ouest. Le mois de septembre 2002 est plutôt chaud et humide. En 2003 on retrouve

l'alternance des types de temps avec un début de saison plutôt léthargique de type 4 et ceci jusqu'au 12 août puis une succession de type 1 et de type 6 et 7 voir 6+ jusqu'à la fin septembre. Remarquons qu'un type de temps 7 dit de transition précède généralement les types 2, 5 voire 4 mais n'est en revanche pas nécessaire pour passer du type 1 au type 6 par exemple. Le type 6 étant en lui-même un temps fortement différent des autres puisque impliquant un bouleversement de la circulation.

De ces analyses des conditions atmosphériques et polliniques de la période 1994-2003, nous proposons de retenir quelques grandes lignes résumées en introduction de la prochaine section. Cette synthèse permet d'affiner les hypothèses de la recherche et d'orienter les prochaines analyses portant exclusivement sur les saisons polliniques c'est-à-dire sur les mois d'août et septembre.

#### 4. Période de pollinisation et conditions atmosphériques

Les analyses présentées en Annexe 2.4 mises en relation avec les comptes effectifs totaux de pollen mesurés par an, permettent de mettre en évidence certaines relations (Tableau 2.23). Le premier élément qui saute aux yeux est l'augmentation manifeste de périodes plus sèches à partir de l'année 1997, plus spécifiquement estivales. Par ailleurs, les concentrations les plus fortes des années 1998 à 2001 s'associent toutes à des printemps chauds. Le facteur précipitations ne semble pas avoir autant d'importance. L'année 2000 est particulièrement humide autant au printemps qu'en été alors que 1999 et 2001 sont sévèrement sèches et toutes trois enregistrent pourtant les comptes les plus élevés dans l'Ouest. Remarquons toutefois qu'aux autres stations, le déficit hydrique des années 1999 et 2001 semble être légèrement à l'avantage de concentrations totales un peu plus élevées de pollen. L'année 2001 est en effet l'une des années qui compte, à toutes les stations, parmi les trois plus polliniques. Elle se caractérise par un printemps et un été chauds (environ 1°C au dessus de la normale 51-80) de même que par des déficits hydriques très marqués. 1999 est la seconde année plus pollinique dans 3 sites de mesure. Elle présente les mêmes caractéristiques thermiques et d'humidité que 2001 avec toutefois un printemps plus chaud et sec mais plus proche de la normale sur ce point de vue et un été beaucoup plus chaud que la normale et aussi sec que 2001. La troisième année fortement pollinique est 2000 qui se caractérise par un printemps très chaud mais aussi très humide et un été plus frais que la normale mais toujours humide. Elle est donc différente des autres. Enfin, l'année 1998, année fortement pollinique également, se caractérise comme étant une année dont le printemps fut absolument extrême du point de vue des températures mais relativement normal question précipitations ainsi

qu'un été chaud (même ordre de grandeur que 2001 et 2002) et sec. Nous remarquons globalement que les printemps et étés à tendance plutôt chaude et sèche semblent être plus favorables à des comptes élevés.

La Figure 2.55 permet de visualiser la distribution des types d'années polliniques selon l'échelle désignée dans le Tableau 2.16 sous la forme de nuages de points corrélant les concentrations polliniques totales moyennées sur l'île avec d'une part (a) les anomalies de température annuelle, printanière et estivale et d'autre part (b) celles de précipitations. Des tendances de corrélations entre anomalies de température et de précipitations et quantités de pollen récoltées par saison apparaissent. Toutefois, la seule qui soit statistiquement significative est celle entre la température annuelle et les concentrations polliniques ( $r_s=0.699$ ). Notons aussi que la température annuelle est significativement corrélée avec la température printanière ( $r_s=0.784$ ). Plus les anomalies de la température sont positives, plus les quantités de pollen mesurées et cumulées pendant une saison complète sont potentiellement élevées. En ce qui concerne les anomalies de précipitations, les corrélations ne sont jamais significatives mais on peut dire en revanche que les relations sont inversées. C'est-à-dire que plus les anomalies sont importantes, moins on devrait avoir de pollen, ce qui veut aussi dire que trop de précipitations a globalement un effet réducteur sur les quantités globales de pollen.

(a)	PRTPS	ETE	ANNEE
1994	FH	CH	FH
1995	CH	CH	CH
1996	FH	CH	NH
1997	FS	NS	FS
1998	CH	CS	CS
1999	CS	CS	CS
2000	CH	FH	CH
2001	CS	CS	CS
2002	FH	CS	CS
2003	FH	CS	FH

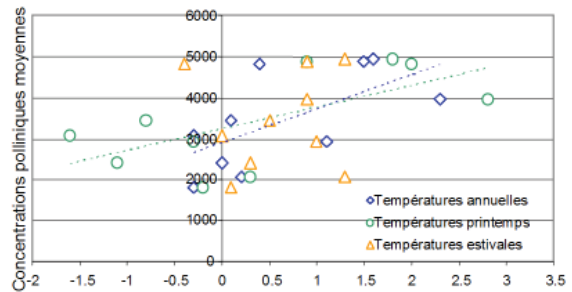
(b)	OUEST	VL	CV	EST	Moyenne Île
1994		1800			1800
1995		2056			2056
1996		1979	2867		2423
1997	3279	1710	2955	4366	3078
1998	5932	3080	3094	3765	3968
1999	9523	2701	3628	3906	4940
2000	9906	2375	3133	3899	4828
2001	8619	3531	3518	3902	4893
2002	4089	4910	1214	1465	2920
2003	6071		2081	2206	3453

Echelle en grains de pollen/m<sup>3</sup> d'air

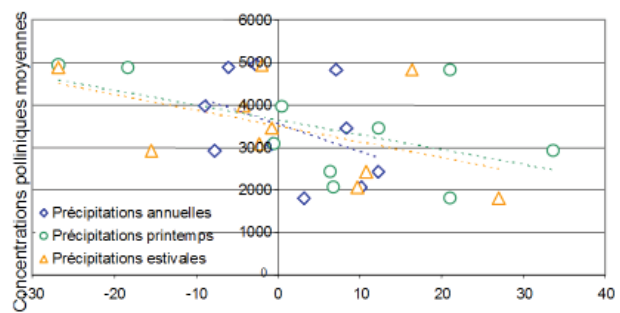
0-2000	faible
2000-4000	moyen
4000-6000	fort
6000 et plus	très fort

Tableau 2.16 : Synthèse des caractéristiques thermiques et de précipitations dans la région Grands Lacs / Saint Laurent entre 1994 et 2003. La première lettre correspond à la température (C pour chaud, N pour normal et F pour frais) la suivante correspond aux précipitations (H pour humide, N pour normal et S pour sec).

Tous ces résultats sont valables à l'échelle régionale dans laquelle la région de Montréal est incluse. Pour affiner cette information, il est maintenant nécessaire d'analyser les relations entre comptes polliniques et données météorologiques provenant de l'aéroport international de Montréal.



a)



b)

Figure 2.55 : Corrélations entre (a) température (annuelle, printanière et estivale) et (b) précipitation (annuelle, printanière et estivale) et comptes pollinique moyennés sur l'île à partir des valeurs mesurées aux 4 stations

La consultation des bases de données polliniques nous révèle que durant la décennie à l'étude, 4 années sont fortement polliniques sur les 10 disponibles, qui sont, toutes stations confondues et par ordre décroissant, 1999, 2000, 2001 et 1998 (Tableau 2.33).

	OUEST	VL	CV	EST
1	2000 avec 26/08	2002 avec 01/09	1999 avec 28/08	1999 avec 28/08
2	1999 avec 28/08	1998 avec 28/08	2001 avec 26/08	2001 avec 05/09
3	2001 avec 10/09	1999 avec 25/08	2000 avec 29/08	2000 avec 27/08
4	1998 avec 27/08	2000 avec 29/08	1998 avec 26/08	1998 avec 28/08

Tableau 2.17 : Classement dégressif des 4 années les plus polliniques par station avec indication de la date du pic majeur

Les stations Centre Ville et Est présentent exactement la même configuration en termes de succession d'années. Par ailleurs, les pics de maximum de concentration de pollen se produisent en même temps en 1999 et 1998 et sont légèrement décalés l'un par rapport à l'autre en 2001 au profit du CV et en 2000, au profit de l'Est. A la station Ouest, on retrouve les mêmes années prédominantes mais dans un ordre différent. Notons par ailleurs que la seule

année durant laquelle le pic de pollen est en phase en ces trois points de mesure est 1999. La station Ville Lasalle présente quant à elle un comportement plus particulier. L'année la plus pollinique y est l'année 2002 qui est en revanche partout ailleurs, l'une des moins polliniques aux autres stations.

L'allure des courbes polliniques des saisons en question (Figure 2.9) montre que la courbe de l'année 1999 présente une forme *a priori* « typique » avec un maximum principal suivi d'un maximum secondaire. L'année 2000 est d'allure relativement assez proche de la précédente avec une légère précocité du maximum dans l'Ouest sur les autres stations. En 2001, on note une forme plus « atypique » caractérisée par une succession de nombreux pics secondaires non négligeables pour finalement atteindre le pic majeur dans l'Ouest en fin de saison, le 10 septembre. Cette année là, c'est au Centre Ville que le pic majeur a lieu en premier le 26/08, puis dans l'Est et à VL. Il se trouve aussi que le Centre Ville est un peu en déphasage avec les autres stations du 23/08 au 28/08. L'année 1998 se rapproche quant à elle des années 1999 et 2000 par la forme des courbes qui la caractérisent. Notons aussi un certain nombre de données manquantes aux stations Ouest et Est ce qui a pour effet de sous estimer les comptes totaux. Enfin l'année 2002, qui ne compte pas parmi les années les plus polliniques loin de là, à part à VL, est une année très étrange. Même dans l'Ouest qui est la station où les comptes sont généralement plus abondants qu'ailleurs dans n'importe quelle autre circonstance, ils y sont de beaucoup réduits tout en demeurant cependant équivalents à ceux de VL. Cette année ne compte pas de données manquantes.

Au regard de ces différentes considérations de même que devant le fait que les autres années disponibles sont soit incomplètes, soit ne caractérisent que l'une ou l'autre station nous décidons de porter une attention plus particulière à cinq de ces années, à savoir : 1998, 1999, 2000, 2001 et 2002, quatre années fortement polliniques et une, faiblement pollinique. Nous nous attendons à ce que 1999 et 2000 présentent des comportements plus ou moins semblables. 2001 est une année pollinique atypique dans cette succession d'évènements polliniques qui la caractérisent et 2002 est l'une des années les plus faiblement polliniques globalement mais fortement pour la station VL.

#### 4.1. Relations entre conditions de printemps, d'été et quantités de pollen

Les conditions de température et de précipitations de la région Grands lacs/Saint Laurent indiquent que 2000 a connu un printemps très chaud et humide, à l'inverse de 1999 et 2001 pour qui le printemps fut respectivement très chaud et chaud ainsi que très sec. 2002 en revanche se caractérise par un printemps plus frais et plus humide

que 2000. Concernant les étés, 1999 a connu une saison chaude et sèche ainsi que 2001 et 2002 alors que 2000 fut frais et humide. Ces descriptions à l'échelle de la grande région ne sont cependant pas nécessairement comparables aux informations obtenues à l'Aéroport International de Montréal. Il a en effet été montré que des différences non négligeables pouvaient apparaître. Ainsi concernant les températures, 1999 se caractérise par un printemps très chaud (écart entre Tmax et Tmin en juin particulièrement faible et températures élevées) ainsi que 2001. Les printemps 2002 et 2000 sont quant à eux plus frais. L'été 2000 est frais avec une baisse importante de Tmax et Tmin en juillet et septembre. En revanche, 1999, 2001 et 2002 sont des étés chauds. Les informations concernant les degrés jours de croissance ainsi que ceux de réfrigération confirment ces observations. La question est dès lors de savoir si l'année 2000, qui bien que très fortement pollinique, notamment dans l'Ouest est une année plutôt fraîche tant au printemps (mais un peu plus chaude que 2002) qu'en été. Cette fraîcheur relative ne semble pas être à première vue un facteur limitant de la production pollinique. L'année 2002 en revanche est également fraîche au printemps mais excessivement chaude durant l'été et présente des comptes de pollen très faibles partout, sauf à VL. Est-il possible d'envisager que la température du printemps soit moins limitante que celle de l'été du point de vue de la production ou de la libération du pollen par les plantes?

Ces conditions thermiques seules ne sont pas suffisantes pour expliquer ce phénomène. Voilà pourquoi nous nous intéressons maintenant aux conditions d'humidité avec dans un premier temps la question de l'humidité relative. Les printemps les plus humides en ordre décroissant d'humidité sont 2000 et 2002. Les plus secs sont 1999 et 2001. Quant aux étés, le plus humide est 1999 et les plus secs 2002 et 2001. L'été 2000 se trouve dans la moyenne de la période mais comme toutes les autres années bien en deçà de la normale. La forte sécheresse de l'été 2002 est-elle responsable des faibles quantités de pollen émises dans l'atmosphère ? Outre l'humidité relative, les précipitations peuvent aussi contribuer à l'explication de différents phénomènes observés. Avec les précipitations, on doit considérer tant le nombre de jours de précipitations et leur fréquence que le type de précipitation, soit leur intensité et leur durée. Ainsi les printemps 2000 et 2002 sont les plus pluvieux mais 2000 bien que très pluvieux n'est pas le plus « mouillé ». Il se caractérise par une succession de petites pluies fines. Les plus secs sont 1999 et 2001. Les étés les plus secs sont 2002, 2001 et 2000 par ordre croissant de précipitations et le plus humide est 1999, notamment à cause de précipitations abondantes en septembre, en termes de quantités de précipitations mesurées. L'été 2002 connaît une sécheresse sans pareil en août et durant la première moitié de septembre. La grande sécheresse de l'été 2002 est-elle en mesure d'expliquer les faibles quantités de

pollen recueillies cette année là ?

L'ensoleillement, nous apprend que les printemps les plus ensoleillés furent 1999 et 2001 au dépend de 2002 et 2000 et que les étés les plus ensoleillés furent quant à eux 2002 et 2001 au dépend de 2000. 1999 se situe dans la moyenne. Ce résultat est fortement corrélé à la température.

Les conditions de la pression atmosphérique offrent une idée de l'emplacement du centre de basse pression par rapport à la région à l'étude. Le printemps 2000 est caractérisé par la pression la plus basse comparativement aux trois autres années parmi lesquelles 1999 et 2001 sont les plus fortes et 2002 bien qu'élevée est en deçà des précédentes. En été, cette variabilité est moins marquée qu'au printemps mais on peut dire que l'année 1999 a connu une pression relativement basse, que 2000 et 2001 sont dans la norme et que celle 2002 fut plutôt forte. Ce paramètre est bien corrélé avec le paramètre précipitations.

Le vent enfin, sous ses composantes « vitesse » et « direction » est responsable du transport du pollen. On note une tendance globale à l'augmentation de la vitesse du vent vers la fin de la décennie étudiée. Par ailleurs, de manière générale, le printemps est plus venteux que l'été. Le printemps le plus venteux est 2000, suivi de près par 2002 puis 2001 et 1999. Toutes ces années sont quoiqu'il en soit au-dessus de la normale de saison et 1999 se trouve dans la moyenne. Concernant l'été, 2001 est le plus venteux suivi de 2002, 2000 et 1999. Concernant la composante direction, en août, une dominance des vents du SW est observable avec une poussée en 2000 (2/3 du mois affectés par cette orientation du vent). Cette même année une augmentation de la fréquence des vents provenant du SE est visible. En septembre, la variabilité la plus forte est notée en 2001. Cette année-là, toutes les classes de vent sont représentées de façon assez équitable notamment le NE, SE et SW. En 2002 on relève une plus grande fréquence de vents du NW qu'autrement.

Les types de temps sont en quelque sorte chacun la synthèse de tous les précédents paramètres pour un moment donné en un lieu donné. Le type de temps 1 « tempéré sec » est caractéristique de l'été à Montréal et se trouve donc toujours plus ou moins en toile de fond. Les années 1999, 2000 et 2001 voient une relativement grande alternance de journées de types de temps très différents, tels 1 « tempéré sec », 2 « polaire sec », 4 « tempéré humide », 5 « polaire humide », 6 « tropical humide » ou 7 « de transition ». L'année 1999 présente deux voire 3 épisodes plutôt chauds et relativement durables dans le cas de celui de début septembre, mais le reste du temps alterne entre du tempéré sec et du tempéré humide. L'année 2000 est plus précisément sous l'influence d'une alternance de types de temps plutôt frais

avec des types de temps plus normaux de l'été. L'année 2001 est quant à elle, plus chaude. 2002 est caractérisée par une persistance du type de temps « tempéré sec ».

De façon générale, les concentrations sont fortement corrélées à la température de l'air. Il nous intéresse de voir qui de la Tmax ou Tmin ou de l'écart entre les deux est la plus déterminante. Outre ces très bonnes relations il semble que l'humidité relative estivale soit aussi limitante des conditions de pollinisation. Deux aspects retiennent notre attention. L'été 2002 qui a connu une sécheresse extrême est une année très faiblement pollinique. Cette année a aussi expérimenté un printemps particulièrement frais et humide. L'été 2001 qui n'est certes pas la plus pollinique mais est tout de même non négligeable, a également connu un été plutôt sec mais cette fois au même titre que 1999 très fortement pollinique, un printemps très chaud et sec. Par ailleurs, il semble que les précipitations intenses de type orage sont plus limitantes que de fines pluies pendant la saison de pollinisation de l'ambrosie. Enfin, la circulation atmosphérique nous laisse à penser qu'à l'échelle régionale, les situations de haute pression, anticycloniques sont beaucoup plus limitantes que celles associées à des passages de fronts dans le cadre de circulations de basse pression. En termes de types de temps, le type 1 est probablement plus limitant que le type 6 qui vient du Sud. Afin d'être en mesure de prévoir, jusqu'à un certain point, ces années de fort risque d'allergie, il importe de distinguer quels sont plus spécifiquement les paramètres ou les conjonctions d'entre eux, annonceurs d'années fortement polliniques. Une approche plus statistique permet de faire ressortir, si elles existent, les relations entre les concentrations de pollen et les conditions atmosphériques.

#### 4.2. Corrélations entre météorologie estivale et pollen de fin d'été

##### i. Analyses considérant les données globales

Dans un premier temps, la totalité du pollen mesuré est considérée comme provenant d'un site unique fictif et elle est mise en relation avec les situations météorologiques de l'aéroport, mesurées simultanément durant l'ensemble de la saison ou mois par mois. Dans le même ordre d'idée, nous appliquons la même démarche ensuite mais en distinguant les stations de mesure. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2.18. Des tendances globales apparaissent sous la forme de coefficients de corrélations de Spearman pour différentes valeurs seuils de  $\alpha$ .

Considérant les résultats pour la saison globale, les corrélations sont toujours significatives ( $\alpha = 0.05$ ) à hautement significatives ( $\alpha = 0.01$ ) avec la température maximale partout ainsi que la température minimale et de fait, la température moyenne, à part dans l'Est de l'île. Toutefois, bien que ces corrélations soient hautement



significatives la plupart du temps, les coefficients demeurent quant à eux plutôt faibles. La station qui présente les meilleurs coefficients est celle de ville Lasalle. Les observations sont quelque peu différentes si l'on se penche sur les valeurs mensuelles. On voit alors apparaître que le mois de septembre offre les meilleures et plus nombreuses corrélations positives avec ces paramètres thermiques. Ce n'est absolument pas le cas en août qui connaît plutôt des corrélations négatives voire inexistantes comme c'est le cas à VL. Concernant les autres paramètres météorologiques peu font autant l'unanimité que la température. Cependant, remarquons quand même des corrélations négatives, significatives et hautement significatives, avec les paramètres d'humidité relative. Sur la base globale et saisonnière, elles existent mais sont faibles ; un peu plus marquées en septembre. Il en est de même dans l'Ouest et de nouveau VL offre les meilleurs résultats. En revanche ni l'Est, ni le CV, ne montrent d'effets de ce paramètre.

SAISON	MOY94-03	OUEST97-03	VL94-02	CV96-03	EST97-03
TT94-03	-0.069**	-0.066	-0.083	-0.059	-0.057
Tmax94-03	0.249**	0.230**	0.356**	0.240**	0.126*
Tmin94-03	0.169**	0.160**	0.219**	0.177**	0.075
Tmoy94-03	0.216**	0.199**	0.308**	0.215**	0.097
Hmax94-03	-0.107**	-0.119*	-0.159**	-0.082	-0.017
Hmin94-03	-0.122**	-0.120*	-0.205**	-0.065	-0.042
Prec94-03	-0.077**	-0.090	-0.123**	-0.046	-0.038
VitV94-03	0.017	0.126*	-0.019	-0.032	-0.034
DirV94-03	-0.050*	0.054	-0.094*	-0.090	-0.058
Ins94-03	0.174**	0.179**	0.210**	0.158**	0.136**
PmsI94-03	0.006	-0.062	0.084	-0.007	-0.011
DD+594-03	0.216**	0.199**	0.307**	0.215**	0.097

Tableau 2.18 : Résultats des corrélations non paramétriques de Spearman effectuées avec l'ensemble des données disponibles pour chacune des stations de mesure de pollen entre 1997 et 2003 pour 3 d'entre-elles et 1997 et 2002 à Ville Lasalle ainsi que pour une station fictive, moyenne des 4 ou 3 disponibles selon les années (Valeurs hautement significatives (\*\*), significatives (\*) au seuil  $\alpha = 0.010$  ; significatives (\*) au seuil  $\alpha = 0.050$  (test bilatéral))

Allant dans le même sens, des tendances négatives apparaissent avec les précipitations, voire même des corrélations significatives négatives notamment avec l'ensemble des données et VL. L'insolation est un paramètre qui fait de nouveau l'unanimité entre les stations avec des corrélations positives hautement significatives toutefois relativement faibles à part en septembre partout. Il n'est pas possible en revanche d'en dire autant de la pression atmosphérique avec laquelle les relations ne sont pas bien définies à part une corrélation positive et significative en septembre à VL. De telles analyses, il est possible de retenir que quelque soit la station considérée, température et ensoleillement ont des effets positifs sur les quantités de pollen mesurées. L'effet est en revanche inversé avec l'humidité relative et les précipitations dont l'impact sur les concentrations de pollen est négatif. Concernant le vent, rien n'est vraiment apparent, mis à part que la vitesse de celui-ci est déterminante des concentrations dans l'Ouest. Plus il est fort, plus les concentrations augmentent. Il apparaît donc que les meilleures conditions de dispersion du pollen sont

significativement liées à de bonnes conditions thermiques associées à un bon ensoleillement et parfois un vent soutenu mais qu'en revanche, précipitations et humidité dans l'air limitent les quantités de pollen collectées.

Un fait intéressant et surprenant est à noter. Si les corrélations sont bonnes au niveau de la saison, elles sont encore meilleures en septembre mais en revanche ne le sont absolument pas en août, laissant apparaître la possibilité que le début de la saison jusqu'au pic principal soit plus déterminée par les conditions de printemps ou de juillet que celles du reste de l'été. Afin de vérifier ceci, nous avons distingué mais cette fois-ci sans distinction de station ce que Farnham *et al.* (1989) appelle « onset » soit le démarrage et « plateau ». Ce sont 2 des quatre subdivisions arbitraires employées par les auteurs afin de définir l'allure des courbes saisonnières d'ambrosie (Figure 1.3). Le démarrage commence avec le début de la saison et s'étend jusqu'au pic majeur de pollen. Le plateau fait suite à ce pic majeur jusqu'à la dernière apparition de 30 grains/m<sup>3</sup> d'air. Le plateau correspond au plus fort de la saison de pollinisation. C'est-à-dire que nous nous intéressons dès ce moment-là uniquement au début de la saison et à son cœur. Les résultats figurent dans le Tableau 2.19. Nous remarquons que le démarrage jusqu'au pic majeur ne présente aucune corrélation apparente alors qu'en revanche le plateau en présente un certain nombre, du même type d'ailleurs que celles préalablement présentées. Les paramètres thermiques et de vitesse de vent ont un effet positif sur les concentrations alors que l'humidité et les précipitations ont un effet négatif. Les mêmes observations sont valables lorsqu'à ce plateau on ajoute les valeurs des pics majeurs avec cependant une petite nuance.

Paramètres météorologiques	Toutes données confondues			
	Démarrage	Plateau	Pic majeur + plateau	Jour d'avant
Température maximale	0.020	0.367**	0.416**	0.241**
Température minimale	-0.029	0.282**	0.323**	0.165**
Température moyenne	-0.002	0.351**	0.400**	0.212**
Humidité relative maximale	0.041	-0.227**	-0.222**	-0.068**
Humidité relative minimale	-0.031	-0.117**	-0.131**	-0.110**
Précipitations	0.005	-0.156**	-0.132**	-0.096**
Vitesse du vent	-0.043	0.105*	0.098*	-0.064**
Insolation	0.029	0.169**	0.175**	0.178**
Pression atmosphérique	0.006	-0.005	-0.012	0.038
Degrés jours de croissance	-0.002	0.350**	0.399**	0.212**
Types de temps	-0.024	0.019	0.034	-0.069**

Tableau 2.19 : Résultats des corrélations non paramétriques de Spearman effectuées avec l'ensemble des données selon la décomposition de Farnham (1989) (Valeurs hautement significatives (\*\*), significatives (\*) au seuil  $\alpha = 0.010$  ; significatives (\*) au seuil  $\alpha = 0.050$  (test bilatéral))

Dans ce cas, l'effet de la température est renforcé ainsi que celui de l'humidité mais ce n'est plus le cas des précipitations. On peut imaginer, que celles-ci ne doivent pas être particulièrement abondantes à l'occasion des pics majeurs de pollen, alors qu'en revanche, le maximum de pollen est atteint lorsque la température est élevée. Une dernière analyse permet de montrer que les concentrations polliniques quotidiennes sont soumises à l'influence des conditions atmosphériques des 24 heures précédentes.



L'effet des paramètres thermiques est notamment non négligeable ; résultat déjà trouvé entre autre par Farnham *et al.* (1989).

ii. Analyses considérant les années

Il est fort probable que certaines années soient plus propices que d'autres à montrer de bonnes corrélations entre pollen et conditions du temps. Les mêmes analyses que précédemment ont donc été menées mais en considérant cette fois les données de tous les sites confondus par année puis celles des sites pris individuellement par année pendant la saison au complet. Le Tableau 2.20 fournit les résultats pour les données confondues des 4 stations. Ce qui est immédiatement remarquable est que l'année 1999 présente à la fois les meilleures et les plus nombreuses corrélations avec l'ensemble des paramètres météorologiques, mis à part les types de temps. Les mêmes observations que préalablement sont faites. L'année 1996 présente également de bonnes corrélations avec les paramètres thermiques et ceux d'humidité ou les précipitations. Les années 1997 et 1998 montrent quant à elles, des corrélations positives avec l'humidité. On peut d'ailleurs contrôler (Figure 2.22) qu'au cours de ces deux étés, l'anomalie de précipitations est nulle. L'été 2000 compte quant à lui parmi les étés plutôt frais et humides. On remarque qu'il y a à cette occasion quelques corrélations significatives positives avec la température, de même qu'avec la pression barométrique.

Toutes données confondues par année										
Paramètres météorologiques	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Température maximale	0.080	0.048	0.454*	0.204*	0.185*	0.596*	0.283*	0.124	0.226*	0.084
Température minimale	-0.054	-0.081	0.320*	0.153*	0.330*	0.405*	0.143*	0.084	0.182*	-0.155*
Température moyenne	0.008	-0.057	0.444*	0.148*	0.265*	0.545*	0.188*	0.102	0.220*	-0.046
Humidité relative maximale	0.089	-0.308*	-0.381*	0.322*	0.244*	-0.489*	-0.140	-0.315*	-0.175*	-0.350*
Humidité relative minimale	-0.127	-0.324*	-0.277*	0.181*	0.273*	-0.395*	-0.027	0.007	-0.280*	-0.389*
Précipitations	-0.093	-0.221	-0.171	0.109	0.124	-0.279*	-0.055	-0.011	-0.087	-0.351*
Vitesse du vent	-0.129	0.080	-0.009	-0.254*	0.090	-0.210*	-0.135	0.056	0.327*	0.222*
Insolation	0.116	0.210	0.242*	0.058	0.054	0.250*	0.039	0.180*	0.183*	0.494*
Pression atmosphérique	0.048	-0.069	0.109	0.015	-0.253*	0.161*	0.299*	-0.081	-0.058	0.140
Degrés jours de croissance	0.008	-0.059	0.444*	0.148*	0.285*	0.545*	0.188*	0.102	0.220*	0.140
Types de temps	-0.038	-0.145	-0.149	-0.003	0.021	0.028	-0.089	-0.002	-0.224*	-0.138

Tableau 2.20 : Résultats des corrélations non paramétriques de Spearman effectuées avec l'ensemble des données classées par année (Valeurs hautement significatives (\*\*\*) au seuil  $\alpha = 0.010$  ; significatives (\*) au seuil  $\alpha = 0.050$  (test bilatéral))

L'été 2001 est moyennement chaud et très sec (le plus sec de la décennie) En 2002, une corrélation est forte et positive avec la vitesse du vent. Cet été est moyennement chaud et moyennement sec. L'été 2003 est en revanche légèrement plus chaud mais ni sec ni humide, très proche en fait de 1999. Le même genre d'analyse a été réalisé par site de mesure et par année pour les saisons polliniques complètes (Tableau 2.21). Dans tous les cas de figure, l'année 1999 demeure celle qui présente ici encore les meilleures et plus nombreuses corrélations entre paramètres météorologiques et concentrations polliniques. Celles-ci sont particulièrement marquées avec les paramètres thermiques, notamment Tmax et les degrés jours de croissance.

Ouest										
Paramètres météorologiques	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Température maximale				0.062	0.139	0.650*	0.279	0.242	0.257*	0.001
Température minimale				0.138	0.343*	0.411*	0.125	0.246	0.207	-0.192
Température moyenne				0.086	0.249	0.569*	0.186	0.248	0.250	-0.087
Humidité relative maximale				0.348*	0.340*	-0.494*	-0.185	-0.374*	-0.179	-0.383*
Humidité relative minimale				0.276	0.376*	-0.490*	-0.098	0.011	-0.296*	-0.405*
Précipitations				0.204	0.272*	-0.321*	-0.138	-0.075	-0.076	-0.385*
Vitesse du vent				-0.075	0.132	-0.181	-0.119	0.312*	0.408*	0.305*
Insolation				-0.074	-0.038	0.381*	0.036	0.088	0.200	0.520*
Pression atmosphérique				-0.197	-0.375*	0.128	0.382*	-0.191	-0.083	0.059
Degrés jours de croissance				0.066	0.249	0.569*	0.188	0.248	0.250	0.059
Types de temps				0.033	0.038	-0.019	-0.109	0.066	-0.276*	-0.126

Ville Lasalle										
Paramètres météorologiques	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Température maximale	0.080	0.048	0.454*	0.305*	0.204	0.715*	0.283*	0.103	0.350*	
Température minimale	-0.054	-0.081	0.265*	0.188	0.328*	0.503*	0.174	-0.004	0.287*	
Température moyenne	0.008	-0.057	0.419*	0.212	0.281*	0.665*	0.215	0.037	0.332*	
Humidité relative maximale	0.089	-0.308*	-0.294*	0.336*	0.229	-0.474*	-0.108	-0.318*	-0.177	
Humidité relative minimale	-0.127	-0.324*	-0.297*	0.140	0.243	-0.393*	0.023	-0.051	-0.278*	
Précipitations	-0.093	-0.221	-0.109	0.017	0.033	-0.314*	-0.008	-0.080	-0.077	
Vitesse du vent	-0.129	0.080	-0.058	-0.254	0.005	-0.359*	-0.077	-0.032	0.333*	
Insolation	0.116	0.210	0.266*	0.137	0.075	0.206	0.063	0.301*	0.179	
Pression atmosphérique	0.048	-0.069	0.181	0.112	-0.179	0.231	0.264	0.062	0.044	
Degrés jours de croissance	0.008	-0.059	0.419*	0.212	0.281*	0.665*	0.215	0.037	0.332*	
Types de temps	-0.038	-0.145	-0.119	-0.042	-0.022	0.058	-0.108	-0.066	-0.175	

Centre Ville										
Paramètres météorologiques	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Température maximale	0.465*	0.234	0.241	0.631*	0.295*	0.295*	0.156	0.186	0.100	
Température minimale	0.364*	0.189	0.367*	0.448*	0.170	0.142	0.186	0.138	-0.138	
Température moyenne	0.471*	0.185	0.314*	0.588*	0.215	0.146	0.202	0.029		
Humidité relative maximale	-0.525*	0.311*	0.247	-0.508*	-0.161	-0.354*	-0.128	-0.404*		
Humidité relative minimale	-0.280	0.241	0.228	-0.372*	0.008	0.039	-0.231	-0.385*		
Précipitations	-0.254	0.279*	0.130	-0.285*	0.007	0.006	0.018	-0.347*		
Vitesse du vent	0.052	-0.251	-0.006	-0.194	-0.125	0.047	0.352*	0.188		
Insolation	0.221	0.015	0.148	0.214	-0.002	0.131	0.184	0.600*		
Pression atmosphérique	0.055	-0.006	-0.170	0.136	0.284	-0.099	-0.174	0.128		
Degrés jours de croissance	0.471*	0.185	0.314*	0.588*	0.215	-0.146	0.202	0.128		
Types de temps	-0.173	0.038	-0.022	0.083	-0.045	-0.002	-0.176	-0.138		

Est										
Paramètres météorologiques	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Température maximale				0.137	0.605*	0.548*	0.192	-0.031	0.179	0.159
Température minimale				0.194	0.692*	0.378*	0.109	-0.062	0.146	-0.173
Température moyenne				0.130	0.690*	0.508*	0.136	-0.052	0.179	-0.029
Humidité relative maximale				0.299*	-0.100	-0.520*	-0.198	-0.274*	-0.186	-0.307*
Humidité relative minimale				0.256	0.133	-0.428*	-0.071	0.085	-0.316*	-0.447*
Précipitations				0.270*	0.135	-0.260	-0.075	0.061	-0.128	-0.384*
Vitesse du vent				-0.203	0.268	-0.063	-0.187	-0.067	0.315*	0.150
Insolation				-0.053	0.106	0.252	-0.013	0.117	0.172	0.553*
Pression atmosphérique				-0.018	-0.228	0.096	0.395*	-0.108	-0.097	0.227
Degrés jours de croissance				0.130	0.690*	0.508*	0.136	-0.052	0.179	0.227
Types de temps				0.053	0.116	0.060	-0.061	-0.019	-0.277*	-0.154

Tableau 2.21 : Résultats des corrélations non paramétriques de Spearman effectuées avec les données classées par site et par année (Valeurs hautement significatives (\*\*\*) au seuil  $\alpha = 0.010$  ; significatives (\*) au seuil  $\alpha = 0.050$  (test bilatéral))

A l'Ouest, il s'agit de la meilleure année. 1997 et 1998 montrent quant à elles comme précédemment des corrélations positives avec l'humidité relative et en 1998 d'autres avec la pression mais négative. Ce comportement est l'inverse de la station Est cette année là qui là-bas connaît les meilleures corrélations positives avec la température. Sinon peu importe les stations, à part en 1996 à Ville Lasalle, nous ne trouvons rien de bien significatif jusqu'en 2003. Cette année présente alors des corrélations essentiellement négatives avec les paramètres d'humidité et de précipitations dans tous les sites disponibles, positives avec l'insolation partout et la vitesse du vent en plus dans l'Ouest.

Une question demeure qui est de se demander pourquoi il existe autant de diversité de comportement d'une station de mesure à une autre. Certes, il existe un schéma global de comportement commun décelable à l'échelle de la saison pollinique mais en même temps, certaines relations sont de meilleure qualité dans certains sites plus que dans d'autres. Afin d'affiner cette démarche, le critère de la

direction du vent est maintenant considéré de manière à voir dans quelle mesure sa provenance est plus influente. Il ne faut pas non plus oublier que ces données de pollen proviennent toutes de sites différents et sont comparées à une base de données météorologiques unique, provenant de l'aéroport. Certes, ce sont des données régionales mais cela n'empêche en rien, que chacun des sites expérimente des conditions micro locales spécifiques, qui interviennent pour expliquer ces différences de comportement. Cette analyse sera faite dans le chapitre 4 à partir des données du modèle.

iii. Analyse considérant la provenance du vent

Toutes les données confondues, les corrélations sont toutes significatives et positives avec les paramètres thermiques englobant les températures (Tmax, Tmin et Tmoy, l'insolation et les degrés jours de croissance). En revanche, elles ne sont pas très fortes. La meilleure d'entre elles a lieu avec Tmax ( $r_s=0.249$ ). En revanche, même si aucune n'est significative, remarquons qu'elles sont toutes négatives avec les paramètres d'humidité (HRmax et HRmin) de même que les précipitations. Ensuite, le Tableau 2.22 présente le comportement des paramètres les uns vis-à-vis des autres en fonction des 4 directions principales du vent à savoir, les quarts NE, SE, SO, NO. Sur l'ensemble des données, les quart SE, SO et NO offrent les meilleures corrélations, notamment avec les paramètres thermiques. Dans tous les cas, les corrélations avec la température sont hautement significatives. En ce qui concerne l'humidité, les corrélations sont négatives mais meilleures cependant lorsque le vent vient du NE (HRmin). Ce quart NE présente aussi deux caractéristiques que l'on ne rencontre pas ailleurs. Il offre de bonnes corrélations avec l'ensoleillement mais qui n'est probablement pas ici corrélé avec des températures élevées ou suffisantes pour favoriser le vol du pollen. Il offre également de bonnes corrélations avec la pression atmosphérique. Il faut imaginer que dans des situations de vent du NE, la situation synoptique est de nature anticyclonique relativement fraîche.

Le Tableau 2.23 complète le précédent en décomposant cette fois-ci, chaque quart en deux de manière à obtenir des plus de subdivisions. Le paramètre toujours le plus régulièrement sollicité est sans nul doute la température avec des valeurs de corrélations hautement significatives et des coefficients assez bons de l'E au NO.

La région du SSE présente le plus grand nombre de corrélations, en particulier avec l'humidité. Elles sont négatives et hautement significatives. Elle compte parmi les provenances dominantes du vent (Figure 2.56) mais n'est pas la principale. Les régions Sud (SE et SW) de façon globale se voit attribuer des coefficients de corrélation significatifs et positifs avec la vitesse du vent. On peut imaginer que ceci est dû au fait que les

masses d'air qui émanent du Sud, arrivent par le biais de courants de dépression, venteux et potentiellement chargés de pollens extra locaux. La corrélation négative avec la pression atmosphérique que l'on voit poindre avec les vents de provenance SSO va dans ce sens.

Paramètres météorologiques	Saison	Toutes données confondues						
		[0-90]	[90-180]	[180-270]	[270-360]	Nord	Sud	[135-225]
Température maximale	0.249**	0.133*	0.414**	0.234**	0.308**	0.223**	0.283**	0.276**
Température minimale	0.169**	-0.016	0.155**	0.188**	0.338**	0.169**	0.178**	0.158**
Température moyenne	0.216**	0.089	0.290**	0.216**	0.323**	0.208**	0.237**	0.227**
Humidité relative maximale	-0.107**	-0.148*	-0.133*	-0.077*	-0.139*	-0.128**	-0.096**	-0.145**
Humidité relative minimale	-0.122**	-0.322**	-0.207**	-0.066	0.040	-0.139**	-0.115**	-0.139**
Précipitations	-0.077**	-0.201**	-0.085	-0.052	0.003	-0.095*	-0.068*	-0.044
Vitesse du vent	0.017	-0.060	-0.094	0.094*	0.129*	-0.003	0.024	-0.028
Insolation	0.174**	0.443**	0.180**	0.103**	0.075	0.253**	0.131**	0.092*
Pression atmosphérique	0.006	0.211**	0.051	-0.049	-0.127*	0.047	-0.016	-0.034
Degrés jours de croissance	0.216**	0.089	0.289**	0.216**	0.322**	0.207**	0.237**	0.226**
Types de temps	-0.069*	-0.208**	-0.009	-0.024	-0.075	-0.146**	-0.028	0.003

Tableau 2.22 : Résultats des corrélations non paramétriques de Spearman effectuées avec toutes les données classées suivant les 4 directions principales du vent (Valeurs hautement significatives (\*\*\*) au seuil  $\alpha=0.010$  ; significatives (\*) au seuil  $\alpha=0.050$  (test bilatéral))

Paramètres météorologiques	Toutes données confondues							
	[0-45]	[45-90]	[90-135]	[135-180]	[180-225]	[225-270]	[270-315]	[315-360]
Température maximale	0.202*	-0.250*	0.442**	0.481**	0.199*	0.269*	0.351**	0.061
Température minimale	0.267**	-0.449*	0.447*	0.871**	0.249*	0.164*	0.819**	-0.025
Température moyenne	0.250**	-0.399*	0.444*	0.299*	0.219*	0.217*	0.366**	0.014
Humidité relative maximale	-0.134	0.860	0.030	-0.182*	0.110	-0.064	-0.155*	-0.002
Humidité relative minimale	-0.275*	0.351*	0.183	-0.264*	0.062	-0.064*	0.066	-0.112
Précipitations	-0.134	0.217	0.081	-0.192	0.062	-0.109*	0.025	-0.002
Insolation	-0.089	0.154	0.189	-0.179*	0.199*	0.018	0.114	0.117
Pression	0.401**	0.234*	0.075	0.229*	-0.087	0.179*	0.022	0.028
Pression atmosphérique	0.111	0.231*	-0.082	0.100	-0.189*	0.022	-0.124*	-0.138
Degrés jours de croissance	0.292**	-0.209*	0.444**	0.294*	0.219*	0.217*	0.389**	0.014
Types de temps	0.202*	-0.291*	0.442**	0.481**	0.199*	0.269*	0.351**	0.061

Tableau 2.23 : Résultats des corrélations non paramétriques de Spearman effectuées avec toutes les données classées suivant les 8 directions principales du vent (Valeurs hautement significatives (\*\*\*) au seuil  $\alpha=0.010$  ; significatives (\*) au seuil  $\alpha=0.050$  (test bilatéral))

Enfin, les vents du Nord ne sont pas à négliger. Il s'agit des vents provenant du NE pour l'essentiel qui eux sont positivement corrélés avec la pression atmosphérique et présentent des corrélations négatives avec les types de temps. Les types de temps polaires (2 : sec et 5 : humide) de même que tempérés (1 : sec et 4 : humide) prévalent probablement sur les types de temps plus chauds ou de changement de temps.

Une analyse un peu plus fine nous a amené à regarder plus particulièrement ce qu'il se passait dans 2 des stations à l'étude. La première, celle de l'Ouest, présente un intérêt manifeste double. D'une part, elle se situe à la porte d'entrée des pollens venant du Sud et d'autre part son emplacement au cœur d'une source majeure de l'île fait qu'elle offre une image immédiate et intense des événements marquants la saison pollinique. La seconde station qui retient notre attention est celle du centre ville, pour deux raisons également. D'une part, le pollen qui y est mesuré ne devrait pas être produit sur place ou en faible quantité seulement et d'autre part, il s'agit d'un milieu fortement convoité par une population nombreuse de pendulaires et donc qui peut affecter une large part de la population si pollen il y a.

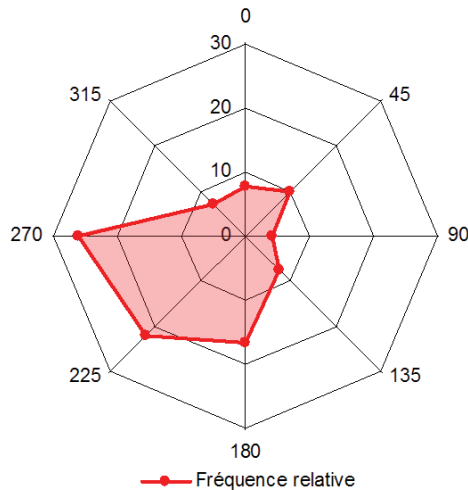


Figure 2.56 : Rose des vents présentant la distribution des fréquences relatives de vent toutes données confondues entre 1994 et 2003 à l'aéroport Pierre-Elliott Trudeau de Montréal (1891 situations). Les valeurs en degrés se répartissent ainsi : 0 représente [337.5; 22.5], 45 [22.5; 67.5], 90 [67.5; 112.5], 135 [112.5; 157.5], 180 [157.5; 202.5], 225 [202.5; 247.5], 270 [247.5; 292.5], 315 [292.5; 337.5]

La Figure 2.57 met en relation les quantités moyennes et la part sur le total de pollen, mesurées pour des directions spécifiques du vent en chacune de ces stations et à l'ensemble des stations. Les variations de quantités sont importantes d'une direction de vent à l'autre et d'un site à l'autre mais elles sont quoiqu'il en soit, fortement corrélées entre elles. Concernant les quantités moyennes, remarquons que 3 directions dominent sur l'ensemble de la région à l'étude ainsi qu'au centre ville et à l'Ouest. Il s'agit des directions NNE, SSE et WSW auxquelles on peut également ajouter toute la région SSW à WNW à la station Ouest. Le poids de la direction SSE y est un peu moins fort qu'ailleurs (11.9% contre 16.5 au CV) en revanche celui de l'WNW est plus fort (16.5% contre 10 au CV). La direction WSW fait l'unanimité avec plus du tiers de la charge pollinique partout. Les corrélations entre les concentrations polliniques et les paramètres météorologiques ont été analysées pour les trois principales provenances du vent. Les résultats figurent au Tableau 2.24. Suivant la direction NNE, toutes les stations confondues montrent des corrélations positives et significatives avec les facteurs thermiques. Il en va de même au CV et à l'Ouest, à part avec l'insolation. Selon l'orientation SSE, les corrélations sont positives et significatives avec les paramètres thermiques également mais négatives avec l'humidité relative et la vitesse du vent. Il en est de même au centre ville et à l'Ouest. Seul le paramètre Tmax apparaît comme étant corrélé positivement. Enfin, selon l'orientation OSO, on retrouve le même cas de figure que selon la direction SSE avec la corrélation avec la vitesse en moins et des coefficients de corrélations moins forts également. Il en va de même en CV et à l'Ouest. Nous en retirons que seule la direction SSE présente de vraiment nombreuses et bonnes

corrélations, tout au moins toutes stations confondues et au CV. A l'Ouest, globalement, seuls les paramètres thermiques semblent être vraiment déterminants des concentrations de pollen mesurées.

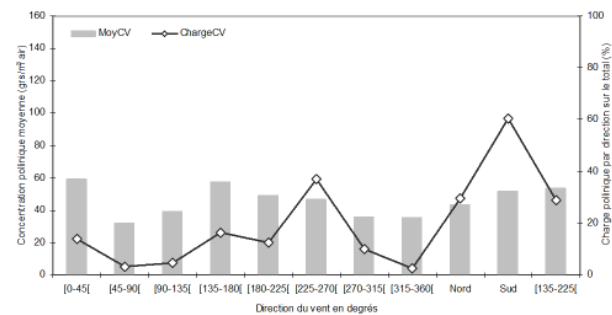
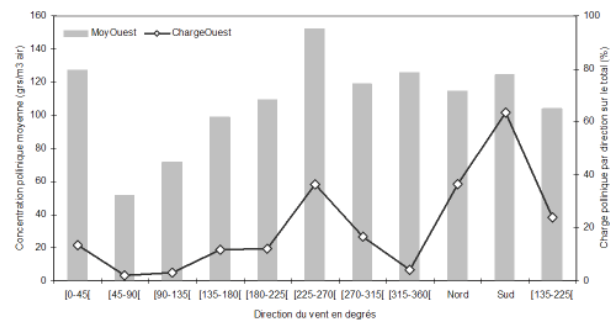
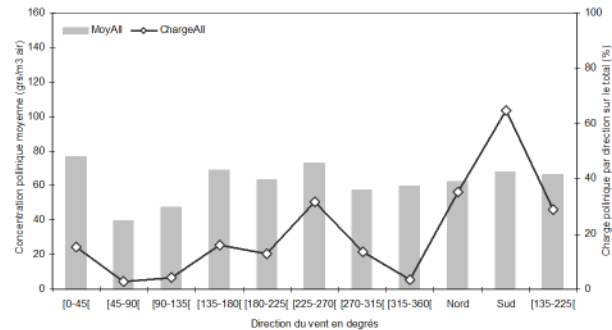


Figure 2.57 : Distribution de la moyenne (histogramme) pollinique et de la charge (nuage de point) associées à chaque direction de vent pour les stations Ouest et CV ainsi que la globalité des données

Finalement et pour clore cette section, nous retenons que peu importe la provenance du vent, les paramètres thermiques privilégient la plupart du temps des corrélations positives et significatives avec les concentrations de pollen mesurées. Les orientations SE à SO favorisent certainement, pour une certaine part, l'arrivée de pollen « extra local ». Les situations du NE et de l'E correspondent probablement plus à des situations anticycloniques quant à celles de l'O sont plutôt associées à des remontées d'air dépressionnaire en provenance du Sud ou du Sud Ouest plus continental donc potentiellement moins humide.

All pollen	0-50	60-100	110-150	170-200	210-250	0-40	45-90	95-135	140-180	185-225	230-270	275-315	315-360	None	Sea	1135-1230
TTM4-03	-0.299	-0.359	-0.024	-0.075	-0.050	-0.448	-0.547	0.021	0.039	-0.039	-0.053	-0.167	-0.149	-0.070	0.003	0.223
TTM9-03	0.133	0.414	0.234	0.209	0.282	-0.269	0.462	0.491	0.339	0.265	0.201	0.061	0.223	0.233	0.276	0.276
TTM9-03	-0.010	0.155	0.186	0.338	0.181	-0.448	0.447	0.071	0.245	0.164	0.419	-0.037	0.169	0.170	0.100	0.100
TTM9-03	0.089	0.269	0.216	0.333	0.260	-0.338	0.454	0.336	0.230	0.215	0.380	0.014	0.269	0.237	0.237	0.237
HRM9-03	-0.148	-0.133	-0.077	-0.139	-0.131	0.005	-0.005	0.182	-0.116	-0.058	-0.158	-0.062	-0.129	-0.066	-0.145	-0.145
HRM9-03	-0.322	-0.207	-0.066	0.040	-0.275	-0.201	-0.103	-0.184	0.065	-0.099	0.000	-0.112	-0.139	-0.115	-0.139	-0.139
PM9-03	-0.201	-0.085	-0.052	0.003	-0.129	-0.217	-0.001	-0.105	0.055	-0.100	0.027	-0.092	-0.095	-0.060	-0.044	-0.044
VW9-03	-0.090	-0.194	0.044	0.129	-0.093	0.154	0.105	0.178	0.169	0.077	0.114	0.117	-0.003	0.024	-0.020	-0.020
W9-03	0.442	0.169	0.163	0.075	0.487	0.204	0.070	0.229	-0.057	0.182	0.000	0.229	0.260	0.211	0.092	0.092
PM9-03	0.211	0.051	-0.049	-0.127	0.110	0.201	-0.092	0.108	-0.188	0.021	-0.124	-0.139	0.047	-0.019	-0.034	-0.034
DD-03-03	0.089	0.289	0.216	0.322	0.289	-0.338	0.454	0.234	0.230	0.235	0.380	0.014	0.267	0.237	0.237	0.237

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)

Cv pollen	0-50	60-100	110-150	170-200	210-250	0-40	45-90	95-135	140-180	185-225	230-270	275-315	315-360	None	Sea	1135-1230
TTM9-03	-0.278	-0.053	0.004	0.007	-0.121	-0.459	-0.178	0.059	0.117	-0.034	0.027	-0.102	-0.101	-0.020	0.025	0.025
TTM9-03	0.050	0.409	0.228	0.258	0.224	-0.471	0.492	0.398	0.227	0.272	0.301	-0.001	0.169	0.204	0.203	0.203
TTM9-03	-0.013	0.152	0.192	0.330	0.219	-0.555	0.430	0.008	0.283	0.242	0.415	-0.047	0.169	0.194	0.162	0.162
TTM9-03	0.046	0.282	0.213	0.392	0.281	-0.552	0.439	0.250	0.246	0.298	0.358	-0.037	0.173	0.229	0.236	0.236
HRM9-03	-0.168	-0.134	-0.040	-0.131	-0.185	0.162	-0.128	-0.153	-0.048	-0.083	-0.146	-0.031	-0.111	-0.069	-0.108	-0.108
HRM9-03	-0.316	-0.186	0.000	0.116	-0.287	-0.211	-0.088	-0.247	0.117	0.008	0.157	0.014	-0.063	-0.063	-0.061	-0.061
PM9-03	-0.278	-0.101	-0.008	0.125	-0.213	-0.249	0.037	-0.148	0.132	0.002	0.157	0.102	-0.062	-0.061	-0.042	-0.042
VW9-03	-0.114	-0.160	0.040	0.181	-0.234	0.171	0.121	-0.283	0.053	0.089	0.138	0.200	-0.040	-0.034	-0.110	-0.110
W9-03	0.437	0.238	0.074	0.050	0.394	0.157	0.206	0.241	-0.100	0.128	0.014	0.163	0.178	0.129	0.067	0.067
PM9-03	0.282	0.062	-0.089	-0.206	0.187	0.081	-0.148	0.181	-0.281	-0.039	-0.177	-0.287	0.044	-0.039	-0.045	-0.045
DD-03-03	0.040	0.282	0.213	0.320	0.281	-0.552	0.439	0.250	0.246	0.298	0.358	-0.037	0.144	0.209	0.236	0.236

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)

Clust pollen	0-50	60-100	110-150	170-200	210-250	0-40	45-90	95-135	140-180	185-225	230-270	275-315	315-360	None	Sea	1135-1230
TT97-03-03	-0.109	-0.024	0.021	-0.019	0.161	-0.406	-0.148	0.001	-0.010	0.002	0.032	-0.158	-0.057	-0.069	-0.061	-0.061
TTM97-03-03	0.040	0.280	0.274	0.327	0.205	-0.437	0.270	0.329	0.225	0.292	0.343	0.211	0.209	0.282	0.245	0.245
TTM97-03-03	-0.087	0.030	0.228	0.391	0.162	-0.717	0.535	-0.076	0.263	0.176	0.432	0.182	0.194	0.171	0.130	0.130
TTM97-03-03	0.003	0.148	0.245	0.264	0.215	-0.527	0.396	0.109	0.289	0.225	0.308	0.175	0.199	0.208	0.166	0.166
HRM97-03-03	-0.178	-0.047	-0.082	-0.258	-0.113	-0.033	0.015	-0.099	-0.045	-0.048	-0.250	-0.233	-0.206	-0.073	-0.068	-0.068
HRM97-03-03	-0.315	-0.160	-0.080	0.011	-0.175	-0.424	0.005	-0.204	0.042	-0.108	0.087	-0.179	-0.146	-0.115	-0.109	-0.109
VW97-03-03	-0.115	-0.071	-0.082	-0.040	0.008	-0.210	0.047	-0.078	0.162	-0.148	-0.090	-0.148	-0.071	-0.087	0.011	0.011
W97-03-03	0.006	-0.017	0.151	0.237	-0.029	0.212	0.556	-0.156	0.254	0.090	0.238	0.243	0.132	0.116	0.031	0.031
HR97-03-03	0.088	0.130	0.113	0.064	0.348	0.387	-0.218	0.282	-0.141	0.181	0.039	0.207	0.249	0.144	0.081	0.081
PM97-03-03	0.166	-0.026	-0.025	-0.172	-0.019	0.489	-0.287	-0.011	-0.274	0.026	-0.148	-0.379	-0.048	-0.066	-0.100	-0.100
DD-03-03	0.003	0.148	0.245	0.264	0.215	-0.527	0.396	0.109	0.289	0.225	0.307	0.175	0.199	0.208	0.166	0.166

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0.05 (test bilatéral)

Tableau 2.24 : Valeurs de  $r_s$  pour différentes directions du vent aux sites de l'Ouest, Cv et tous sites confondus

Ainsi, des critères distinctifs nous permettent de caractériser les masses d'air qui survolent Montréal et induisent des conditions plus ou moins favorables à des concentrations élevées de pollen dans l'air. La dernière analyse que nous proposons désormais est de tenir compte des types de temps. En effet, l'usage d'une classification de types de temps a de l'intérêt si l'on peut en effet associer des périodes plus ou moins critiques à tel ou tel autre type de temps.

iv. Analyse considérant les types de temps

Cette dernière approche se veut plus « globale ». Elle ne tient plus compte, au premier abord, des paramètres météorologiques pris un par un, mais bien d'un ensemble de conditions atmosphériques caractérisant la qualité de la masse d'air au-dessus de la région de Montréal. Elle présente l'intérêt manifeste si elle s'avère fructueuse, d'être plus simple puisque ne relevant plus que d'un seul facteur, le numéro du type de temps, et non plus de l'ensemble des paramètres atmosphériques. Ce facteur unique est mis en relation avec les concentrations polliniques mesurées mais distribuées au sein de classes de risque de manière à simplifier également le traitement des données aérobiologiques et notamment la transmission des résultats au public cible. Ainsi traitement des conditions atmosphériques et polliniques, analyse des résultats et retransmission de l'information au public pourraient s'avérer autant d'étapes simplifiées.

L'objet ici est de valider cette approche en analysant sa faisabilité et sa fiabilité de manière à garantir une bonne qualité de l'information restituée de même qu'une capacité à fournir des résultats généralisables à une région relativement étendue en vue de faire de la prévision pollinique. Nous envisageons par ce biais, d'obtenir des résultats directement traduisibles pour la population étant donné que l'objectif ultime est de rendre disponible

rapidement une information la plus proche possible de la réalité, des conditions atmosphériques et polliniques. Pour réaliser cette analyse nous regardons si le classement des masses d'air par type de temps, offre l'opportunité de déceler parmi les paramètres météorologiques des comportements spécifiques à certains types de temps vis-à-vis des concentrations polliniques. Le but ultime est ensuite de remplacer les valeurs de concentrations polliniques par les classes de risque employées par la Ville de Montréal (Tableau 2.3). Ce sera l'objet de la section portant sur l'analyse du risque (section 6.1). Pour cela nous aurons préalablement aussi identifié comment se distribuent ces classes de risques pendant la période à l'étude et en fonction des types de temps rencontrés.

Le Tableau 2.25 présente les résultats des corrélations de Spierman effectuées en considérant un classement tenant compte des types de temps. Il est tout à fait remarquable de noter que ces corrélations sont plus nombreuses, significatives et fortes en septembre qu'en août. Nous retrouvons ici l'observation faite à propos du plateau et du démarrage de la saison, tels que définis par Farnham (1989). Le tableau propose les résultats par type de temps et par regroupement de ceux-ci selon des affinités thermiques ou d'humidité. Si nous prêtons attention à ces 4 catégories (Sec, Humide, Tempéré et Tropical), nous remarquons que dans tous les cas les paramètres thermiques sont significativement corrélés aux concentrations de pollen et ceci d'autant plus que les types de temps sont plutôt secs et d'origine tropicale signifiant chauds. C'est aussi à l'occasion de ces types de temps que les corrélations avec l'humidité relative sont les plus déterminantes.

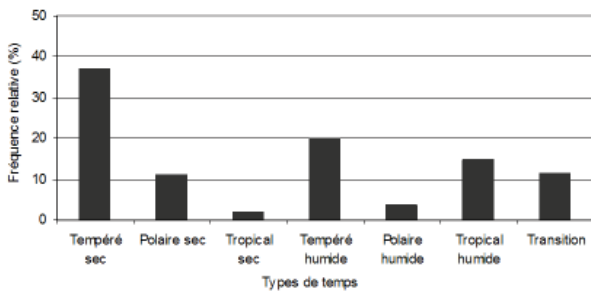
Rien n'apparaît de vraiment significatif concernant la vitesse du vent à part à l'occasion des types de temps 1 (tempéré sec) et 2 (polaire sec) qui dans le premier cas dénote un effet positif de la vitesse du vent sur les concentrations et dans le second cas un effet négatif. Par ailleurs les corrélations sont mieux marquées avec l'humidité relative lors de masses d'air polaire humide. Nous devons toutefois préciser que ces masses 3 et 5 demeurent relativement peu fréquentes à Montréal pendant l'été (Figure 2.57). En août en revanche, le paramètre potentiellement le plus significatif est la pression atmosphérique avec qui la corrélation est positive dans le cas de types de temps polaires alors qu'elle est négative avec les autres.



Paramètres météorologiques	Toutes données confondues										
	TT1	TT2	TT3	TT4	TT5	TT6	TT7	SEC	HUM	TEMP	TROP
Température maximale	0.164*	0.385*	-0.066	0.054	0.018	0.232*	0.404*	0.271*	0.194*	0.162*	0.223*
Température minimale	0.184*	0.340*	-0.444*	-0.087	0.128	0.120*	0.366	0.255*	0.104*	0.064	0.063
Température moyenne	0.188*	0.357*	-0.306*	-0.03	0.124	0.180*	0.404*	0.274*	0.155*	0.118*	0.143*
Humidité relative maximale	-0.076*	-0.005	0.426*	0.04	-0.386*	-0.223*	-0.147	-0.046	-0.125*	-0.094*	-0.193*
Humidité relative minimale	-0.037	-0.075	-0.056	-0.137*	-0.406*	-0.176*	-0.109	-0.094*	-0.197*	-0.116*	-0.197*
Précipitations	0.04	0.001		0.013	-0.222	-0.025	-0.11	-0.029	-0.045	-0.061	-0.055
Vitesse du vent	0.119*	-0.068	-0.494*	-0.157*	0.245	0.185*	-0.08	0.048	0.038	0.031	0.109
Inclinaison	-0.085*	0.138	-0.488*	0.088	-0.016	0.146*	-0.255*	-0.116*	0.131*	-0.027	0.063
Pression atmosphérique	0.063	0.248*	0.063	0.144*	0.325*	0.193*	0.250*	0.126*	0.240*	0.140*	0.206*
Degrés jours de croissance	-0.056	0.101	0.23	-0.129*	0.347*	-0.082	-0.087	-0.007	-0.048	0.011	-0.028
Types de temps	0.187*	0.357*	-0.306*	-0.03	0.124	0.180*	0.404*	0.274*	0.155*	0.118*	0.143*

Tableau 2.25 : Valeurs de  $r_s$  pour différents types de temps, tous sites confondus. Légende : (\*\*\*) valeurs significatives au seuil  $\alpha = 0.01$  (test bilatéral), (\*\*) valeurs significatives au seuil  $\alpha = 0.05$  (test bilatéral), (\*) tendance au seuil  $\alpha = 0.1$  (test bilatéral)

Il semble donc que les types de temps chauds et secs favorisent des concentrations élevées avec un rôle prépondérant des températures et que de façon générale, l'humidité a un effet négatif sur les concentrations. Nous avons également tenu à faire le lien entre ces analyses par type de temps avec celles par direction de vent. Nous voulons en effet voir comment les types de temps se distribuent au sein des trois directions les plus porteuses en pollen et ceci pour les stations Ouest et CV. Le Tableau 2.26 présente les fréquences relatives d'occurrence des types de temps par classe de vent.



Types de temps	Nb de jours 94-03	Fréquence relative (%)
1-Tempéré sec	225	36.9
2-Polaire sec	68	11.1
3-Tropical sec	11	1.8
4-Tempéré humide	123	20.2
5-Polaire humide	23	3.8
6-Tropical humide	91	14.9
7-Transition	69	11.3
Total	610	100

Figure 2.58 : Distribution des types de temps à Montréal pendant la période de pollinisation de l'ambrosie (août et septembre) de la période 1994 à 2003

Trois types de temps dominent, à savoir tempéré sec (1), tempéré humide (2) et tropical humide (6) qui sont d'ailleurs les trois types dominants de la saison à

Montréal (Figure 2.58). Cependant leur distribution selon la provenance des vents laisse apparaître quelques variations qui ne semblent pas tant attachées à la station qu'à la provenance du vent. Aussi bien dans l'Ouest qu'au CV le type tempéré sec domine largement la catégorie de vents du NNE, suivi du tempéré humide. Dans le cas des deux autres orientations, le tempéré sec demeure dominant mais à part égale avec le tropical humide dans le cas des vents venant du SSE. La proportion des masses d'air tropicales humides est quelque peu supérieure à l'Ouest. Enfin, concernant les vents venant de l'OSO, le tempéré sec est de nouveau dominant, suivi du tropical humide (aussi un peu plus marqué dans l'Ouest) et du tempéré humide, quelque peu plus marqué quant à lui au centre ville. Dans tous les cas la proportion des types de temps de transition varie autour de plus ou moins 10%, ce que nous avons déjà noté.

Types de temps	Ouest			Centre Ville		
	[0 - 45[	[135 - 18[	[225 - 270[	[0 - 45[	[135 - 180[	[225 - 270[
Tempéré sec	54.5	30.3	46.8	50.8	33.8	43.1
Polaire sec	1.8	1.5	4.8	3.3	2.6	9.6
Tropical sec	1.8	0	4.8	1.6	0	2.9
Tempéré humide	20	21.2	9.7	23	18.2	13.9
Polaire humide	9.1	3	0.8	9.8	2.6	2.9
Tropical humide	1.8	33.3	22.6	1.6	32.5	16.7
Transition	10.9	10.6	10.5	9.8	10.4	11

Tableau 2.26 : Fréquences relatives d'occurrence des types de temps par classe de vents dominants à l'Ouest et au CV

L'objectif étant en fin de compte de lier ces types de temps à une échelle de risque, celle-ci est abordée dans le cadre de la prochaine section.

## 5. Analyse de risque

Afin de parvenir ultimement à proposer ou suggérer un mode de prévision des risques polliniques, c'est-à-dire d'être en mesure d'annoncer avec une certaine part de certitude que si telles ou telles conditions du temps sont réunies alors les risques d'atteindre des seuils critiques pour la population sensible à l'ambrosie sont réunis, une analyse des risques en relation avec les types de temps doit être faite. Pour y arriver notre démarche est double.

Dans un tout premier temps, la distribution des types de temps à Montréal durant la saison de pollinisation de l'ambrosie, c'est-à-dire leur occurrence, ainsi que les quantités de pollen associées, soit leur charge pollinique, sont rappelées. L'analyse est globale sans distinction de sites, considérant qu'un type de temps quotidien est valable pour la grande région au complet. A ces types de temps sont associées les conditions météorologiques enregistrées à l'aéroport international. De cette analyse préliminaire, il devrait être possible de distinguer quels sont les types de temps les plus à risque en tenant compte tant de leur charge pollinique que de leur occurrence.



Cette analyse globale achevée, il sera question de voir comment se distribuent les classes de risques employées par la Ville de Montréal pour l'information au public. Nous aurons déjà défini préalablement les types de temps les plus à risque mais verrons ainsi vraiment comment se distribuent les risques au sein de ceux-ci, nous permettant ainsi une classification du risque en général. Nous tâcherons d'identifier quelles sont les situations météorologiques les plus critiques de même que celles causant le moins de problème pendant la période de l'ambrosie. Nous analyserons ensuite les effets et comportements des paramètres météorologiques caractérisant les différents types de temps au regard de leur impact dans la détermination du niveau de risque.

Finalement, nous nous posons la question de savoir dans quelle mesure il pourrait y avoir un effet de la persistance des types de temps sur les concentrations de pollen mesurées. Il est en effet possible d'envisager que les conditions du jour précédent soient fortement indicatives de ce qui se passe le jour dit. Si tel est le cas, alors cette possibilité de prévision même à court terme ne serait pas négligeable pour l'information de la population. Préalablement nous consultons les résultats de corrélations de Spearman effectuées afin de définir le degré de relations entre concentrations polliniques et paramètres atmosphériques du jour précédent voire de deux jours avant pour des types de temps particuliers.

### 5.1. Quantités et types de temps : une approche globale

Le Tableau 2.27 présente la distribution des types de temps et de leur charge pollinique respective sur le total de l'ensemble des grains comptés durant la période 1994-2003, sans distinction de sites de mesure. En tout, 1776 cas sont considérés qui ont enregistré en totalité 116 651 grains de pollens. L'analyse du Tableau 2.27 permet de décrire comment se distribuent ces cas entre les différents types de temps expérimentés à Montréal. Comme il a déjà été fait mention dans la section 4.1.2., il est aisé de remarquer que 3 types de temps dominant en terme d'occurrence, à savoir, tempéré sec, tempéré humide et tropical humide. En effet le type de temps tempéré sec compte pour 39.1% des cas. Il explique 42 % de la charge pollinique globale. Vient ensuite le type tempéré humide dans 18.9% des situations. Ce dernier n'explique en dépit de sa forte fréquence d'occurrence que 5.9% de la charge pollinique globale. Il s'agit donc d'un type de temps associé à des conditions faiblement polliniques ou tout au moins défavorables au pollen. Suit le type tropical humide dans 16% des cas, expliquant quant à lui, 20% de la charge pollinique totale, ce qui n'est pas négligeable. A l'inverse du précédent, il semble que ce type de temps offre des conditions plutôt favorables à la pollinisation. Enfin, le type de transition présent 10% du temps compte aussi pour 10% de la charge globale. Ces

4 types de temps expliquent à eux seuls 80% de la charge pollinique globale. Les 20% restant s'expliquent par les deux types polaires (9 et 3.8% du temps) ainsi que le type tropical sec, le moins fréquent de tous puisque occurrent uniquement 2.5% du temps.

Types de temps	Fréquence absolue	Fréquence relative	Concentration totale	Contribution pollinique
(1) Tempéré sec	695	39.1	49550	42
(2) Polaire sec	159	9	6010	5.1
(3) Tropical sec	44	2.5	5009	4.3
(4) Tempéré humide	336	18.9	16906	14.5
(5) Polaire humide	68	3.8	3110	2.6
(6) Tropical humide	285	16	23314	20
(7) Transition	289	10.6	12752	10.9
Total	1776	100	116651	100

Tableau 2.27 : Distribution des types de temps durant la période 1994-2003 à Montréal et charge pollinique associée

La dernière colonne du Tableau 2.27 correspond en quelque sorte à une climatologie basée sur la fréquence d'occurrence. On normalise en divisant la contribution de chaque type de temps par sa fréquence relative. Il ressort que les types de transition et tempéré sec sont « normaux », ce qui explique le climat tempéré estival de Montréal. A l'heure actuelle, les risques associés à ces types de temps sont « normaux ». En vue d'une prévision, il est plus utile de s'intéresser de plus près aux types de temps les plus extrêmes. Nous pouvons ainsi noter que le type tropical sec contribue pour 72% de plus que la normale et le type polaire sec contribue quant à lui pour 44% de moins par rapport à la normale. Qu'advient-il de cette observation dans un contexte de changement climatique ? Si les prévisions qui sont avancées se concrétisent, alors nous pouvons nous attendre à une augmentation de la part des types de temps tropicaux ce qui aura un impact certain sur les risques encourus par la population.

La Figure 2.59 permet quant à elle, de visualiser d'une part la charge pollinique (en %) caractérisant chacun des types de temps sur le total de pollen mesuré pendant la période 1994-2003 ainsi que l'occurrence de ces situations. La distribution préalablement décrite à partir du Tableau 2.27 y est parfaitement apparente. Les types, tempéré sec (1), tempéré humide (4), tropical humide (6) et de transition (7) sont les plus fréquents. Leur contribution co-varie très fortement avec leur fréquence d'occurrence à quelques nuances près. Les types de temps les plus fréquents sont aussi les plus grands contributeurs à la charge pollinique globale, en principe. Il s'agit tout au moins du cas du type tempéré sec. Une exception confirme cependant à cette règle. En effet dans les cas des types, tempéré humide et tropical humide, la répartition est inversée. En effet, le type tempéré humide bien que plus fréquent que le tropical humide contribue pour une moindre part à la charge pollinique globale que le tropical humide. Ce type de temps est donc probablement plus pollinique au coup par coup que le tempéré humide. Notons également le cas du type de temps le moins fréquent de tous qui

n'en est pas moins le plus pollinique. Il s'agit du type tropical sec, qui a lieu moins de 5% du temps mais dont le poids pollinique est très important. Son avenir dans un contexte de réchauffement du climat est sans conteste à surveiller.

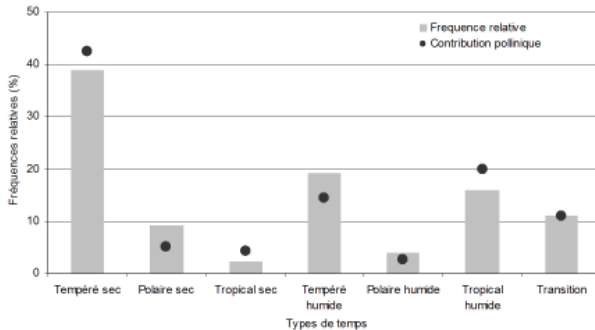


Figure 2.59 : Représentation de la distribution de fréquence des types de temps (histogrammes gris), de la contribution pollinique de chaque type de temps sur la charge pollinique globale (point noir)

Afin d'estimer la contribution « réelle » de chacun de ces types de temps à la quantité totale de pollen mesurée dans la grande région de Montréal durant la saison de l'ambrosie, un certain nombre de paramètres statistiques sont analysés à commencer par la description de l'allure des distributions de ces échantillons par type de temps. En effet, il est nécessaire d'avoir une idée de la variabilité de ces échantillons de manière à être effectivement en mesure de doser avec une plus grande justesse, les risques associés à chacune de ces situations météorologiques. Comme nous pouvons le constater, ces distributions sont totalement asymétriques à droite, ce qui confirme par la même occasion la non normalité des échantillons polliniques relevée en début de chapitre 2 et qui nous a conduit à faire le choix des statistiques non paramétriques (Annexe 2.1). Cependant, le fait d'avoir des distributions aussi asymétriques rend l'interprétation préalablement faite un peu plus délicate. C'est pourquoi, les données fournies dans le Tableau 2.28 offrent quelques indices d'explications.

Le coefficient d'asymétrie confirme dans tous les cas l'observation faite sur le graphique précédent. Les types de temps de transition et polaire humide sont ceux qui présentent les plus fortes d'entre-elles. Dans tous les cas les échantillons sont dits leptokurtiques étant donné que le coefficient d'aplatissement est toujours largement supérieur à 3. Le coefficient de variation est une mesure de la dispersion relative de l'échantillon. Dans tous les cas, il est important mais plus encore dans le cas des deux types de temps précédemment cités. Concernant maintenant la variabilité des échantillons, variance et écart-type fournissent cette information. Notons que le type de temps le plus variable est le tropical sec assez loin devant les autres puis suivent les types de transition et tropical humide. Le type tempéré sec est le moins variable de tous. Afin de juger de la réelle contribution

d'un type de temps aux risques encourus par la population, nous devons tenir compte de l'allure de ces distributions et des paramètres de position que sont la moyenne et la médiane qui les caractérisent. Elles figurent sur la Figure 2.60 et sont représentées sous une autre forme dans les graphiques de la Figure 2.61.

Le pessimisme de la moyenne (Figure 2.61, graphique du haut) est tout à fait remarquable. En effet dans son cas, celle du type tropical sec est en zone rouge signifiant risque élevé, puis les 6 autres types de temps se situent en zone de risque modéré avec au sein de cette classe deux paliers, le plus élevé englobant le tropical humide, le tempéré sec et le type de transition et le second, un peu moins fort, prenant en compte les types tempéré humide bien que fréquent, polaire humide et polaire sec. Apparemment le type tempéré sec étant de loin le plus fréquent mais également l'un des plus polliniques serait potentiellement le type de temps le plus à risque si l'on allie occurrence et quantités. Cette analyse pose un problème, car elle ne tient pas compte de la dissymétrie des distributions (Figure 2.60) et de leur forte variabilité. Avec elle, dans tous les cas de figure, le risque est élevé au moins un jour sur deux.

Afin d'avoir une vision plus réaliste de la signification de ces échantillons, la distribution de la médiane est proposée (Figure 2.61 graphique du bas). Il s'agit de la valeur de la variable qui se situe au centre de l'échantillon. 50% des éléments de l'échantillon ont une valeur inférieure à celle-ci et 50% lui sont supérieurs (Scherrer, 1984). C'est un paramètre robuste et non influencé par les valeurs extrêmes comme l'est la moyenne. Dans ce cas-ci, tous les niveaux de risque associés à cette valeur diminuent, passant à 3 types de temps en zone de risque modéré à 4 d'entre eux, franchissant la barre du risque faible. Parmi les types de temps qui apparaissent ici comme les plus « à risque » nous retrouvons le tropical sec, le tropical humide et le tempéré sec. Le gros changement ici est que le type de transition perd de la vigueur. Vue la définition de la médiane, on peut donc dire que 50% des valeurs de nos échantillons répondent aux critères de risque que nous venons d'énoncer. Il apparaît ainsi plus précisément que le type tropical sec bien que très rare, peut lorsqu'il a lieu, être intense et nocif pour la population sensible. Toutefois, sa chance est d'être très faiblement présente. Les types, tropical humide et tempéré sec, présentent quand à eux, d'une part du fait de la charge pollinique de l'un et d'autre part de leur fréquence d'occurrence respective, le privilège de caractériser des situations potentiellement à risque élevé relativement fréquentes puisque totalisant à eux deux près de 60% des situations estivales, soit plus de 1 jour sur 2 durant la totalité de la saison d'ambrosie.

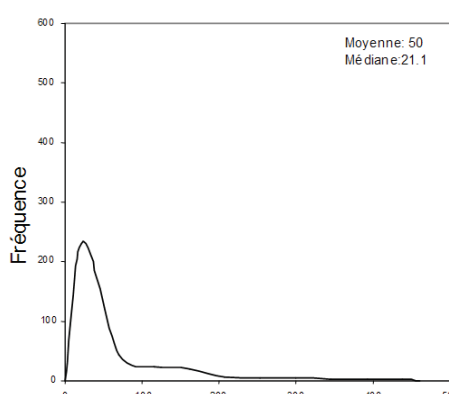
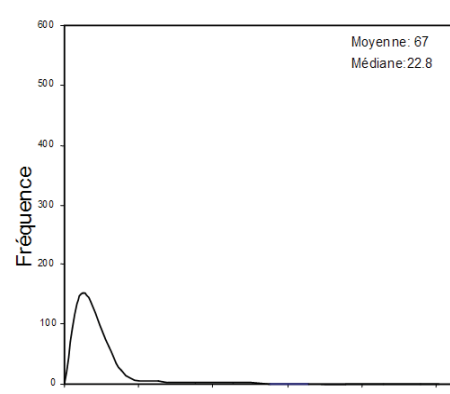
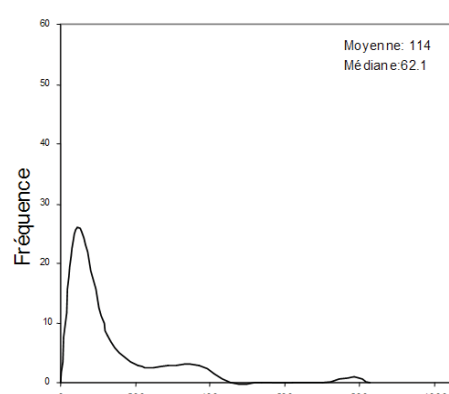
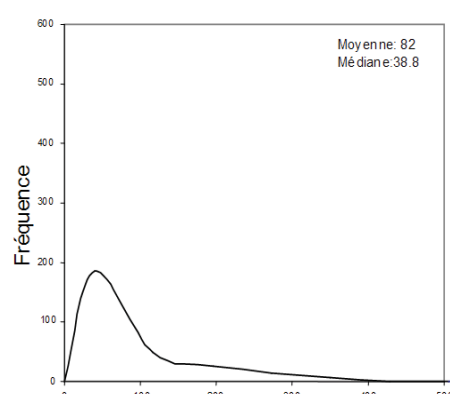
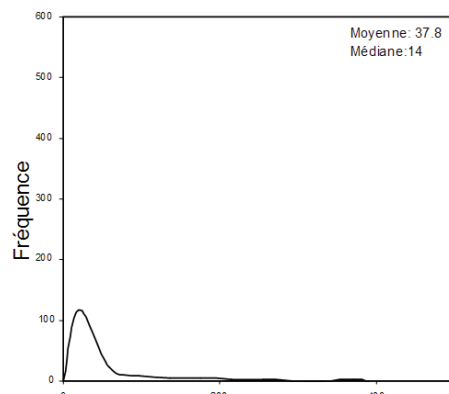
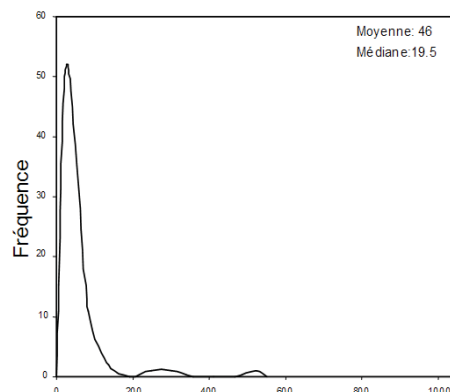
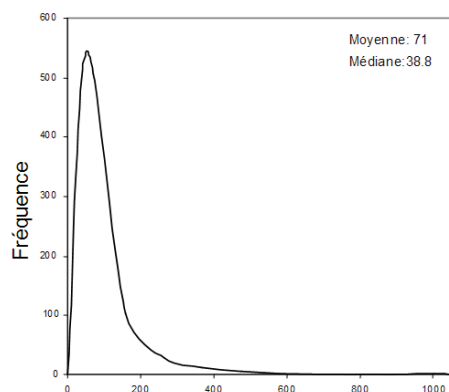


Figure 2.60 : Distribution des échantillons de pollen par type de temps entre 1994 et 2003

Statistiques descriptives	TT1	TT2	TT3	TT4	TT5	TT6	TT7
Minimum	0.0	0.0	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0
1er quartile	11.2	4.6	19.4	6.1	4.7	11.2	6.0
Médiane	38.8	14.0	62.1	21.1	19.5	38.8	22.8
3ème quartile	90.3	42.7	140.9	60.0	49.4	109.9	69.2
Maximum	1053.2	390.7	825.6	461.1	549.7	779.0	1009.9
Etendue	1053.2	390.7	824.1	461.1	549.7	779.0	1009.9
Somme	49550.5	6009.8	5009.4	16905.7	3110.2	23314.2	12751.7
Moyenne	71.3	37.8	113.8	50.3	45.7	81.8	67.5
Aplatissement	20.7	13.0	10.4	7.6	22.3	10.0	25.8
Asymétrie	3.4	3.3	2.8	2.6	4.3	2.6	4.5
CV (écart-type/moyenne)	1.3	1.7	1.3	1.4	1.8	1.3	1.9
Variance d'échantillon	9077.6	3960.2	22544.5	5297.9	6656.2	11504.8	16226.9
Ecart-type d'échantillon	95.3	62.9	150.1	72.8	81.6	107.3	127.4

Tableau 2.28 : Statistiques descriptives des échantillons polliniques respectifs de chaque type de temps entre 1994 et 2003

Afin de préciser la variabilité de ces échantillons, la Figure 2.61 présente également, la distribution de 1.4 X écart types autour de la moyenne et des interquartiles autour de la médiane afin de localiser 50% des données de chacun des échantillons. Dans le cas de distributions quelconques, il existe en effet une règle qui prévoit que dans un intervalle de +/- 1.5 X écart-type autour de la moyenne se trouve 56% de la distribution (Collet, C., 2006, *Com. Perso.*). Ainsi nous remarquons que manifestement, moyenne et médiane travaillent dans des domaines tout à fait différents. Comme nous pouvons le voir sur le graphique du haut, représentant l'évolution de la quantité moyenne de pollen par type de temps, la zone située entre les deux points en pointillés noirs représente 50% de l'échantillon. Cette zone vraiment fort étendue montre bien la très forte disparité des quantités mesurées par type de temps et la moyenne fortement influencée par les valeurs extrêmes. L'interprétation de ce graphique n'est pas aisée. La moyenne et l'écart type dans le cas de distribution asymétrique ne sont pas des paramètres solides. Il y a un risque ici de réellement amplifier des situations qui en réalité ne sont peut être pas si catastrophiques que cela. Ce premier graphique est très pessimiste et conduit le lecteur à une vision erronée de la situation.

Le second graphique présente quant à lui les limites des premiers, troisièmes et quatrièmes quartiles. Nous pouvons ainsi aisément voir dans quelle part des échantillons se situe la majorité des données. Ainsi seuls les types de temps tropicaux sec et humide présentent une part des 50% de leurs effectifs autour de la médiane dans la zone à risque élevé. Le tempéré sec se situe juste à la limite, puis tous les autres et deux par deux, présentent dans le cas du type de transition et du tempéré humide la majorité de leurs effectifs en risque modéré à faible, et dans le cas des deux types polaires, plus de 50% en risque faible à nul. En dépit de cela, dans tous les cas, des événements extrêmes associés à des risques élevés à très élevés peuvent se produire occasionnellement.

En tout état de cause et sur la base de cette climatologie, nous pouvons établir que les types de temps tropicaux sont de nos jours les plus risqués à Montréal du fait des quantités qu'ils transportent et que le type tempéré sec l'est également du fait de la conjonction des quantités certes mais aussi et surtout de sa fréquence d'occurrence. Dans ces trois cas, 1 cas sur 2 et plus appartient aux catégories de risque modéré à fort, ce qui est très largement efficace pour déclencher une situation de crise du point de vue des allergies. Le type de temps de transition peut à l'occasion s'avérer néfaste également avec quelques cas particulièrement polliniques mais 25% des situations s'avèrent être plutôt de risque modéré et 50% d'entre elles faibles. Avec le type tempéré humide et les deux types polaires, plus de 50% des situations se situent dans la zone de risque faible (moins de 25 grains/m<sup>3</sup> d'air/24

heures). La question qui retient maintenant notre attention est de savoir comment au sein de chaque type de temps, se distribuent plus précisément ces différents niveaux de risque.

## 5.2. Risque et type de temps : occurrence et poids pollinique

Le risque associé à un type de temps doit être évalué sous deux aspects. Le premier relève de sa fréquence d'occurrence et le second de la charge pollinique qui lui est associée, à savoir quelle est la part du pollen total mesuré pendant la période à l'étude, transportée ou mesurée sous les conditions prévalentes de ce type de temps donné. Ces deux aspects sont abordés dans cette section et il est bien évident que certains types de temps bien que fréquents ne sont pas nécessairement fortement polliniques alors que d'autres peu fréquents peuvent, à l'occasion, l'être beaucoup plus.

Si nous nous intéressons à ces aspects, c'est que des conditions caractérisant ces types de temps et de celles relatives à l'intensité des risques associés, vont dépendre la bonne santé de la population locale. Le risque le plus élevé est probablement, avec le risque nul, le moins fréquent au cours d'une saison de pollinisation de l'ambrosie. En effet, comme il est possible de le voir dans le Tableau 2.29, les risques les plus extrêmes R4 et R0 ne représentent que 3.04 et 10.7% respectivement des cas. On peut aussi dire qu'il n'est pas rare de dépasser la valeur des 300 grains/m<sup>3</sup> d'air mais que cela n'est pas non plus quotidien! Le risque majeur (R4) est un risque extrême, du point de vue de son impact potentiel sur la population. Ainsi, même si la plupart des allergiques auront déjà réagi bien en deçà de 300 grains/m<sup>3</sup> d'air, le nombre potentiel de malades est maximum sous de telles conditions. Du point de vue purement médical et de la gestion des urgences, la prévision de tels jours peut être déterminante de la bonne marche d'un service de santé préparé à la gestion de crise. Par ailleurs, vu ce qui est prévu concernant l'impact des changements climatiques tant sur la productivité pollinique (Ziska *et al.*, 2004; Rodgers *et al.*, 2004, 2006; Gehrig *et al.*, 2005) que sur l'allongement de la saison, il faut se demander si les conditions associées à ce risque en augmentation au cours des dernières années, pourraient éventuellement devenir de plus en plus fréquentes à l'avenir. Outre le fait que ce risque majeur est potentiellement dangereux pour la population, il n'en demeure pas moins aujourd'hui très peu fréquent (environ 2 jours par saison). Le risque le plus fréquent est le risque faible (R1) avec 36.5% des cas, puis suit de très près le risque modéré (R2) dans 33.6% des situations et finalement le risque fort, 17% du temps. Le Tableau 2.29 offre une vision un peu différente de celle du Tableau 2.27. En plus de fournir seulement la distribution des types de temps, il met en relation ces conditions atmosphériques avec les risques associés. Il

est ici question de voir comment les niveaux de risque se répartissent entre les différents types de temps. Certains types de temps apparaissent-ils d'office toujours plus risqués du fait de l'occurrence particulière d'un risque accru ?

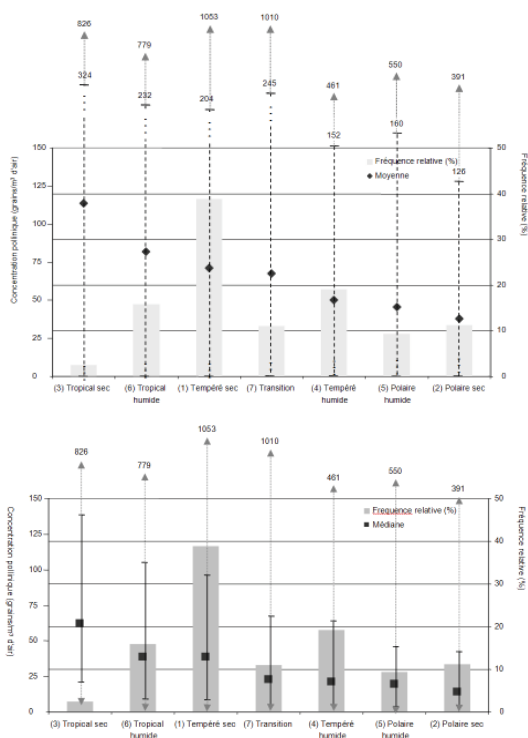


Figure 2.61: Représentation de la médiane et des interquartiles en haut. 50% de l'échantillon se trouve dans la zone tirée en noir. En bas, représentation de la moyenne et de +/- 1.4 X l'écart type, étant reconnu que pour une distribution quelconque cet écart couvre 50% de l'échantillon

Dans un premier temps, notons que tous les types de temps confondus, ce sont les journées de risque faible (36.5%) qui additionnées de celles de risque nul (10%) dominent un peu plus de 45% du temps, soit un peu moins d'un jour sur 2 peut être caractérisé de « sans risque » réel avéré. Les journées de risque élevé à très élevé, c'est-à-dire toutes au-dessus de 100 grains/m<sup>3</sup> d'air, se produisent 17% du temps, soit environ 1 jour et demi par semaine. On peut ainsi dire que durant une saison pollinique, environ 10 jours sont susceptibles de générer des situations d'inconfort majeur pour l'ensemble des allergiques. La classe de risque modéré a une fréquence de 34%. Elle n'est donc pas négligeable d'autant qu'entre 25 et 99 grains/m<sup>3</sup> d'air elle représente une réelle menace pour les allergiques. Il est ainsi possible de dire que plus d'un jour sur deux présente un risque manifeste durant la saison.

	Risque 4		Risque 3		Risque 2		Risque 1		Risque0		Tous	
	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
(1) Tempéré sec	20	3	130	19	264	38	230	33	48	6.7	695	100
(2) Polaire sec	2	1	12	7.6	41	26	74	47	25	16	159	100
(3) Tropical sec	4	9	10	23	13	30	12	27	2	0.5	44	100
(4) Tempéré humide	8	2	46	1.4	102	30	125	37	51	15	336	100
(5) Polaire humide	1	2	5	7.4	25	37	36	53	6	8.8	68	100
(6) Tropical humide	13	5	70	26	100	35	86	30	35	12	285	100
(7) Transition	6	3	29	15	52	28	85	45	25	13	189	100
Tous types de temps	54	3	302	17	597	34	648	37	190	11	1776	100

Tableau 2.29 : Fréquences d'occurrence des risques pour un type de temps donné

En terme d'occurrence de risque, peu importe le type de temps considéré, le risque modéré (R2) est présent dans à peu près toujours les mêmes proportions, environ 33% donc 1/3 des journées de la saison. L'analyse plus précise de la fréquence d'occurrence des risques par rapport au nombre de cas total par type de temps révèle plusieurs éléments. Dans le cas du type tempéré sec le risque modéré est dominant dans 38% des situations. Le type tropical humide montre 35% de cas de risque modéré également. Le tempéré humide est quant à lui dans 37% des cas représenté par un risque faible.

Le Tableau 2.30 fournit les données nécessaires à cette analyse. Les types de temps apparaissent dans la colonne de gauche et chacun des petits Tableaux correspond à un niveau de risque donné. Premièrement et de manière générale, à part lorsque le risque est nul, le type de temps tempéré sec est toujours le plus représentatif pour tous les niveaux de risques et plus spécifiquement sous R3 (44.6% des cas) et R2 (45.7%). Suivent ensuite successivement le type tropical humide particulièrement dans les cas de risque élevé (23.1%) et majeur (20.7%) et le type tempéré humide qui devient de plus en plus présent plus le niveau de risque diminue. Il finit par compter pour 22.8% du temps dans le cas de risque nul. Nous pouvons aussi remarquer que le type de transition fluctue plus ou moins autour de 12% et qu'il est qu'il est le plus fréquent dans le cas de risques extrêmes tant pour le risque majeur (17.3%) que pour le risque nul (14.4%). Cela laisse à penser que les situations associées au changement de temps suivant quand elles ont lieu pendant la saison pollinique sont soit fortement pollinique, soit pas du tout. Nous pouvons aussi noter que plus la part de risque diminue, plus la part des types de temps polaires augmente, jusqu'à compter pour 13.4% des cas dans le cas du risque nul contre 3.1% dans le cas de risque R4. Inversement, le type tropical sec produit dans près de 32% des situations de risque élevé dont 8.7% lors de risques majeurs. Bien que fort peu présent sur une base globale (44 cas sur 1776 situations), ce type de temps, n'en demeure pas moins excessivement dangereux. Concernant le type polaire humide, on s'aperçoit qu'il s'agit d'un type peu représenté pendant l'été mais en part à peu près équivalente (autour de 3% du temps) peu importe le niveau de risque considéré. Les types de temps polaires sont pour un cas sur deux environ, représentés par des cas de risque faible de même que le type de transition. Finalement, nous pouvons conclure à



propos de ces aspects de fréquence de risque ou de type de temps selon le risque, en disant que historiquement dans 70% des cas, tous types de temps confondus, les niveaux de risque sont faibles à modérés, que dans 20% des cas, ils sont forts à très forts et que 10% des journées restantes au cours d'une saison pollinique sont sans risque. La Figure 2.62 permet une synthèse visuelle. Plus on va vers la droite du graphique, plus la part de risque nul et faible augmente ainsi que celle de risque faible et inversement plus on va vers la gauche, c'est celle de risque fort et surtout très fort qui croît. Le type de transition (7) marque en quelque sorte une frontière entre les deux groupes de 3 types de temps chacun. Sa contribution est à peu de chose près équivalente du point de vue des risques plutôt faibles que des plus forts (autour des 50% dans les deux cas). On peut ainsi moduler quelque peu et dire que le risque fort compte pour tout de même 44% de la charge pollinique globale, suivi du risque modéré (27.8%) et enfin du risque majeur (22%) (Tableau 2.31). Les risques faibles à nul ne comptent quasiment pour rien.

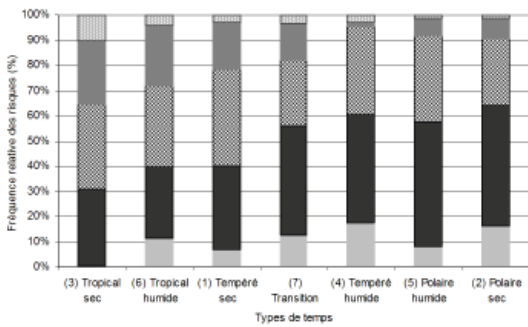


Figure 2.62 : Distribution relative des risques par type de temps en tenant compte de leur contribution pollinique respective sur la part totale attribuée à un type de temps donné

Comme nous pouvons le voir dans les Tableaux 2.31 et 2.32 qui sont en fait des analyses climatologiques de référence qui pourront venir en appui à la prévision, pour tous niveaux de risque confondus, le type de temps le plus porteur (42% du grand total de pollens mesurés entre 1994 et 2003 à Montréal), celui qui a le plus grand poids pollinique est le type tempéré sec. A l'occasion de ce type de temps, le risque le plus porteur est le R3 (46.6% de l'ensemble du pollen mesuré sous ce type de temps) il est par ailleurs aussi le niveau de risque le plus porteur de l'ensemble des quantités de pollen mesuré pendant cette période (20%) (Tableau 2.32). Vient ensuite le type de temps tropical humide qui sur une base globale, explique 20% des quantités de pollen recueillies. Parmi ces 23314 pollens mesurés, 11966 sont attribuables aux cas de risque 3, c'est-à-dire fort. Considérant le grand total de pollen, les journées de risque fort expliquent dans ce cas un peu plus de 10% des événements. Concernant le pollen mesuré lors de conditions de type tropical humide, il s'agit alors de plus de 50% des situations expliquées ainsi.

Vient ensuite le type tempéré humide, qui explique 14.5% du pollen global collecté et dont les journées de risque R3 expliquent 6.3% du grand total ou 44% du pollen mesuré sous ce type de temps. Le type de transition explique 11% de la charge pollinique globale. A travers ce type de temps, ce sont les risques forts et majeurs qui sont les plus déterminants puisque tous les deux réunis compte pour 71% des quantités de pollen mesurées à l'occasion de ce type de temps, ce qui représente aussi 7.8% de la charge saisonnière globale. Viennent ensuite les deux types polaires non significatifs sur une base globale mais plus représentatifs à l'occasion de journées de risque modéré. Finalement reste le type tropical sec qui ne compte globalement que pour 4.3% de la charge globale mais qui si l'on se fie à la distribution des risques pendant ce type de temps, montre que 44% des pollens transportés par ce type de temps sont associés à des journées de risque 4, ce qui n'est pas négligeable. Nous avons déjà noté le fait que bien que très peu fréquent ce type de temps, pouvait réserver des surprises en terme de charge pollinique.

Risque majeur (R4)	Fréquence absolue	Fréquence relative (%)	Concentration totale	Contribution pollinique
(1) Tempéré sec	20	37	8994	35.6
(2) Polaire sec	2	3.7	780	3.1
(3) Tropical sec	4	7.4	2197	8.7
(4) Tempéré humide	8	14.8	2848	11.3
(5) Polaire humide	1	1.9	864	3.4
(6) Tropical humide	13	24	5224	20.7
(7) Transition	3	11.1	4374	17.3
Total	54	100	25281	100

Risque élevé (R3)	Fréquence absolue	Fréquence relative (%)	Concentration totale	Contribution pollinique
(1) Tempéré sec	130	43	23105	44.6
(2) Polaire sec	12	4	2145	4.1
(3) Tropical sec	10	3.3	1756	3.4
(4) Tempéré humide	46	15.2	7408	14.3
(5) Polaire humide	5	1.7	724	1.4
(6) Tropical humide	70	23.2	11966	23.1
(7) Transition	29	9.6	4740	9.1
Total	302	100	51844	100

Risque modéré (R2)	Fréquence absolue	Fréquence relative (%)	Concentration totale	Contribution pollinique
(1) Tempéré sec	264	44.2	14843	45.7
(2) Polaire sec	41	6.9	2312	7.1
(3) Tropical sec	13	2.2	876	2.7
(4) Tempéré humide	102	17.1	5276	16.2
(5) Polaire humide	25	4.2	1188	3.7
(6) Tropical humide	100	16.8	5225	16.1
(7) Transition	52	8.7	2774	8.5
Total	597	100	32494	100

Risque faible (R1)	Fréquence absolue	Fréquence relative (%)	Concentration totale	Contribution pollinique
(1) Tempéré sec	230	35.5	2553	37.4
(2) Polaire sec	74	11.4	747	10.9
(3) Tropical sec	12	1.9	177	2.6
(4) Tempéré humide	125	19.3	1327	19.4
(5) Polaire humide	36	5.6	328	4.8
(6) Tropical humide	86	13.3	865	12.7
(7) Transition	85	13.1	835	12.2
Total	648	100	6832	100

Risque nul (R0)	Fréquence absolue	Fréquence relative (%)	Concentration totale	Contribution pollinique
(1) Tempéré sec	46	24.2	55	27.4
(2) Polaire sec	25	13.2	27	13.4
(3) Tropical sec	2	1.1	4	2
(4) Tempéré humide	51	26.8	46	22.8
(5) Polaire humide	6	3.2	6	3
(6) Tropical humide	35	18.4	34	16.9
(7) Transition	25	13.2	29	14.4
Total	190	100	201	100

Tableau 2.30 : Fréquences d'occurrence des types de temps par niveau de risque et leur charge pollinique respective sur le total des grains comptés pour un niveau de risque donné

Pour compléter cette étude de la répartition des risques selon les types de temps et vice et versa, nous avons noté comment d'un site à l'autre de mesure ces cas se distribuaient. Les résultats figurent dans le Tableau 2.33.

	Risque 4		Risque 3		Risque 2		Risque 1		Risque 0		Tous risques	
	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
(1) Tempéré sec	8994	18	23105	47	14843	30	2553	5.2	55	0	49550	100
(2) Polaire sec	780	13	2145	36	2312	39	747	12	27	1	6010	100
(3) Tropical sec	2197	44	1756	35	876	18	177	3.5	4	0	5009	100
(4) Tempéré humide	2848	17	7408	44	5276	31	1327	7.9	46	0	16906	100
(5) Polaire humide	864	28	724	23	1188	38	328	11	6	0	3110	100
(6) Tropical humide	5224	22	11966	51	5225	22	865	3.7	34	0	23314	100
(7) Transition	4374	34	4740	37	2774	22	825	6.6	29	0	12752	100
Tous types de temps	25281	22	51844	44	32494	28	6832	5.8	201	0	116651	100

Tableau 2.31 : Charge pollinique relative des risques pour un type de temps donné

	Risque 4		Risque 3		Risque 2		Risque 1		Risque 0		Tous risques	
	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
(1) Tempéré sec	8994	7.7	23105	20	14843	13	2553	2.2	55	0	49550	42
(2) Polaire sec	780	0.7	2145	1.8	2312	2	747	0.6	27	0	6010	5.1
(3) Tropical sec	2197	1.8	1756	1.5	876	0.8	177	0.2	4	0	5009	4.3
(4) Tempéré humide	2848	2.4	7408	6.3	5276	4.5	1327	1.1	46	0	16906	14.5
(5) Polaire humide	864	0.7	724	0.6	1188	1	328	0.3	6	0	3110	2.6
(6) Tropical humide	5224	4.5	11966	10	5225	4.5	865	0.7	34	0	23314	20
(7) Transition	4374	3.7	4740	4.1	2774	2.4	835	0.7	29	0	12752	10.9
Tous types de temps	25281	22	51844	44	32494	28	6832	5.8	201	0	116651	100

Tableau 2.32 : Répartition de la charge pollinique globale par niveau de risque et types de temps

L'évolution spatio-temporelle des risques a déjà été traitée dans le cadre de la section 3.1.2.ii. Il a été montré qu'en dépit du fait qu'il n'existe pas de différences statistiquement significatives entre les sites et les années, certains sites sont toujours plus polliniques que d'autres, donc plus à risque, comme c'est le cas du site le plus occidental. Par ailleurs cette situation à haut voire très fort risque demeure extrêmement critique dans l'Ouest, voire même s'accroît avec le temps (VL) ou tend à demeurer stable (CV) ou à s'améliorer (Est). Néanmoins, le seuil clinique étant particulièrement bas (correspondant au risque R1), la situation demeure donc tout à fait critique sur l'ensemble de l'île de Montréal.

	Site Ouest					Site VL				
	R0	R1	R2	R3	R4	R0	R1	R2	R3	R4
(1) Tempéré sec	2	38	55	45	16	22	59	79	32	2
(2) Polaire sec	3	13	5	6	2	11	32	14	2	
(3) Tropical sec		1	4	2	4		2	2	4	1
(4) Tempéré humide	6	21	21	16	7	16	51	26	6	
(5) Polaire humide	1	5	6	1	1	3	14	10		
(6) Tropical humide	6	16	15	24	12	8	24	31	15	1
(7) Transition	2	13	14	8	5	5	33	13	9	
Tous types de temps	20	107	120	102	47	65	215	175	68	4

	Site CV					Site Est				
	R0	R1	R2	R3	R4	R0	R1	R2	R3	R4
(1) Tempéré sec	16	70	67	26		6	63	63	27	2
(2) Polaire sec	8	14	12			3	15	10	4	
(3) Tropical sec	1	5	3	2		1	4	4	2	
(4) Tempéré humide	16	29	33	11		13	24	22	13	1
(5) Polaire humide	1	10	5	2		1	7	4	2	1
(6) Tropical humide	17	19	27	16		4	27	27	15	
(7) Transition	16	20	18	3	2	5	19	7	9	1
Tous types de temps	72	167	165	60	2	33	159	137	72	5

Tableau 2.33 : Distribution du nombre de cas d'un niveau de risque donné par station de mesure

Nous pouvons remarquer que même si aucune différence statistique significative n'a été mise à jour entre les sites, il existe cependant quelques points intéressants que nous pouvons soulever. Les cas de risque 4, moins nombreux que ceux de R3, R2 et R1 voire R0, sont essentiellement répartis au sein des deux sites les plus polliniques à savoir l'Ouest et l'Est avec une prédominance très nette à l'Ouest. Les deux types de temps les plus fréquemment associés à ce niveau de risque sont le tempéré sec et le tropical humide. Concernant le risque nul, il se distribue inversement. Les stations qui en font le plus l'expérience sont VL et CV. Les stations Est et Ouest en enregistrent un moins grand nombre, ce qui n'est pas non plus étonnant connaissant leurs capacités polliniques.

Un type de temps est souvent associé à ce niveau de risque nul. Il s'agit du type tempéré humide. Cela n'empêche pas pour autant les types, tempéré sec et tropical humide, d'en faire aussi l'expérience, mais de manière peut être moins fréquente. Le risque faible est également plus fréquent que le risque nul dans les stations VL et CV au dépend de l'Ouest et l'Est. Dans ce cas ci, le type tempéré sec domine dans tous les cas suivi du type tempéré humide avec également apparition plus régulière du type de temps polaire sec. Il s'agit du niveau de risque le plus fréquent sur la période à l'étude, toutes stations confondues. Vient ensuite le niveau de risque modéré, qui est la encore plus souvent associé aux sites VL et CV. Les types de temps les plus fréquents sont alors les deux types tempérés, avec apparition de plus en plus régulière du type tropical humide et du type de transition. Finalement, le dernier niveau de risque concerne le risque fort qui de nouveau, se trouve être mieux représenté aux deux stations Ouest

et Est mais tout de même relativement fréquent aussi aux sites CV et VL. Il s'agit probablement du niveau de risque pour lequel il y a moins de différences inter sites. Les deux types de temps dominants sont le tempéré sec et le tropical humide.

Il s'avère donc, au regard de ces remarques que parmi les sites étudiés, 2 sont fortement polliniques et 2 beaucoup moins ; que par ailleurs, comme nous l'avions déjà montré, les risques de niveau faible à modéré sont tout de même mieux représentés pendant la saison (70% des cas) que ne le sont les risques forts et majeur (20% des cas) mais qu'en revanche la distribution spatiale fait en sorte que certains sites sont plus susceptibles de plus rencontrer ces situations extrêmes que d'autres. Ainsi les sites de l'Ouest plus particulièrement et celui de l'Est dans une certaine mesure, expérimentent le plus grand nombre de cas de risque d'allergie élevé durant la saison de pollinisation de l'ambrosie. Des sites tels VL et le CV expérimentent des niveaux de risque généralement moindre. Nous pouvons nous demander ce qui marque ces différences spatiales. Il est donc normal de se demander si seul l'emplacement du site par rapport aux sources est déterminant notamment lorsque l'on note que de site en site et pour un risque donné, la distribution de fréquence des types de temps est la même et ne peut donc pas expliquer ces différences de quantités enregistrées.

Afin de compléter cette section sur l'analyse des risques, deux autres points sont encore abordés. Le premier est relatif à la caractérisation météorologique des masses d'air en relation avec le niveau de risque. En effet, la question qui demeure est de parvenir à déterminer si grâce à la lecture des paramètres météorologiques caractérisant les masses d'air, des facteurs précurseurs pourraient ressortir, qui seraient annonciateurs d'éventuels risques croissants et ceci en vue d'avertir la population à temps. Ensuite, il s'agira de voir en quoi les conditions atmosphériques de la veille, voire de l'avant veille peuvent influencer et jusqu'à un certain point, déterminer les concentrations polliniques du jour J. Pour y parvenir le comportement des principaux paramètres météorologiques est analysé et les meilleures corrélations possibles entre les quantités de pollen mesurées ou les risques et les types de temps, ou les conditions qui les représentent sont identifiées.

### 5.3. Paramètres météorologiques et risque croissant

Les graphiques des Figures A2.3-30 et A2.3-31 présentent les moyennes des principaux paramètres météorologiques et polliniques par type de temps et selon les niveaux de risque donnés. L'idée est d'identifier les facteurs météorologiques, s'il en existe, qui déterminent le passage d'un risque modéré vers un risque plus fort sous un même type de temps. Etant donné que nous avons noté une récurrence de mêmes types de temps associés à différents niveaux de risques, il importe de

se demander s'il existe des critères météorologiques qui permettent d'expliquer que sous un type de temps donné, il est occasionnellement possible, même dans les cas les moins « à risque » tels que nous les avons désignés, de voir surgir des journées de risque élevé à très élevé ? Ces extrêmes nous intéressent du fait de l'impact qu'ils ont sur la population. Nous avons précédemment décrit force et occurrence de ces épisodes, il s'agit maintenant de trouver une explication d'ordre météorologique.

Le type tropical sec qui n'est de loin pas le plus fréquent mais qui est le plus pollinique lorsqu'il se présente, est un type de temps très chaud, absolument sec mais, montrant, une légère augmentation de l'humidité relative maximale plus le risque augmente. La direction moyenne du vent est du SO mais passe au SE lors de risques R3 et R4. Le risque associé tend à diminuer avec une augmentation de la vitesse du vent qui varie en moyenne autour de 4 m/s, et inversement il augmente en revanche lorsque la vitesse diminue. La pression atmosphérique est moyenne mais plus elle augmente comme l'insolation, plus le risque croît aussi. Le type tropical humide est lui de même, chaud et humide à la fois. L'humidité relative y est importante peu importe le niveau de risque. Les précipitations sont occasionnellement abondantes mais diminuent drastiquement avec une augmentation du risque. La vitesse du vent y est modérée à vive et son accroissement augmente le risque. Le vent est essentiellement du Sud avec un déplacement vers une composante plus occidentale alors que le risque croît. La pression atmosphérique y est moyenne et comparable au précédent type de temps. En revanche, la corrélation avec le risque est ici négative. L'insolation est fortement dépendante et co-varie donc avec la pression. Passant au type tempéré sec, la température maximale y est encore élevée mais avec des températures minimales beaucoup plus basses que les deux précédents types décrits. Les écarts thermiques y sont donc beaucoup plus marqués. Ces températures tendent à augmenter légèrement à l'occasion de risques forts. L'humidité relative maximale est similaire à celle du type précédant mais les valeurs minimales sont plus basses. Les précipitations ne sont pas inexistantes mais extrêmement limitées. La provenance du vent est du Sud, parfois du SO ou du SE. La pression atmosphérique est très élevée et tend légèrement à diminuer lors de journées de risques forts. L'insolation y est bonne et co-varie encore avec la pression. Le type de transition offre des températures généralement plus basses mais qui en s'élevant significativement entraîne une augmentation manifeste du risque. L'humidité relative est assez forte et les précipitations moyennement abondantes, diminuent avec le risque. Le vent passe de l'E au SE et la vitesse augmente jusqu'à dépasser les 5 m/s à l'occasion de forts risques. La pression est plutôt basse et l'insolation semble dans ce cas un peu plus découplée de ce paramètre. Le type de temps tempéré humide présente des écarts de température moindres mais des

températures plus fraîches en général. Les précipitations diminuent plus le risque est important. L'humidité relative y est élevée et tend à diminuer légèrement à l'occasion de journées de risque élevé. La vitesse du vent est moyenne et diminue avec des risques plus élevés tout en passant de l'Est à l'Ouest. La pression est dans la moyenne et l'insolation de mauvaise qualité, entre 3 et 6 heures par jour en moyenne. Elle est la plus élevée à l'occasion du risque très élevé. Il reste pour finir les deux types polaires. Concernant le type polaire humide, température et humidité sont relativement stables d'une classe de risque à une autre. Les précipitations plutôt faibles diminuent plus le risque est élevé. La vitesse du vent est dans la moyenne mais en ce qui concerne la direction, il y a une accentuation manifeste de la direction vers le Nord plus le risque augmente, passant de l'Est au NE. La pression augmente par ailleurs beaucoup avec les risques. Concernant l'insolation, des données manquantes empêchent une analyse complète mais il semble qu'elle tende à suivre les mêmes tendances que la pression atmosphérique. Enfin, le type polaire sec présente une plus grande amplitude thermique ainsi qu'une légère augmentation vers des risques plus forts. L'amplitude entre humidité relative maximale et minimale est assez marquée et les précipitations sont quasi nulles. La vitesse du vent est moyenne et tend à augmenter plus le risque croît et le vent de l'Ouest passe au Nord Ouest. La pression barométrique très élevée et l'insolation de très bonne qualité, favorisent l'occurrence d'épisodes plus fortement polliniques.

Il apparaît que certains paramètres ne sont manifestement pas de bons indicateurs. Il s'agit notamment de l'humidité relative chez qui on ne détecte pas, de fluctuations notables d'une classe de risque à une autre. Les précipitations quant à elles, sont quasi toujours absentes à l'occasion de risques importants. Ensuite, concernant la température, il semble que l'on note peu importe les types de temps, une relative stabilité d'une classe de risque à une autre. Globalement, on peut voir une légère tendance à l'augmentation de la température avec le risque ou bien encore à la réduction des écarts thermiques entre  $T_{max}$  et  $T_{min}$ . Le type de transition est celui qui montre les plus notables augmentations de la température.

Finalement deux paramètres sont d'assez bons indicateurs qui permettent d'effectuer des regroupements de types de temps par comportement de ces caractéristiques météorologiques. Le premier paramètre est la vitesse du vent. Dans la plupart des cas, à part avec les types 3, 4 et 5, l'augmentation du risque s'accompagne d'un accroissement de la vitesse du vent. Concernant sa provenance, les types tropicaux passent d'un secteur de Sud à un autre, du SO vers le SE pour le plus sec et du SE vers le SO pour le plus humide et le risque augmente notablement. Le type polaire sec passe du SO au NNO et le polaire humide du SE au NE. Les

types tempérés quant à eux, passent de l'E à l'O sans réelle organisation. Le type de transition enregistre une accentuation des flux de composante Sud. Le second paramètre est la pression atmosphérique elle-même très fortement corrélée à l'insolation. Ces deux paramètres co-varient très significativement. Nous notons que 4 types de temps, à savoir polaire sec, polaire humide et tropical sec voient les risques augmenter avec une augmentation plus ou moins marquée de la pression et de l'insolation alors que dans 4 autres cas (tropical humide, tempéré sec et humide et transition), la situation est inversée avec des degrés divers, la baisse étant la plus marquée dans le cas du type tropical humide. Il semble en première approximation que dans certains cas les risques augmentent avec l'installation ou le renforcement de types de temps de nature plutôt anticyclonique (polaires et tropical sec) et que dans d'autres cas, le passage d'un front ou l'arrivée d'une dépression pourraient aussi être à l'origine d'événements de ce type. Enfin des situations telles que les types de temps tempérés sec et humide, peuvent à l'occasion aussi être associées à des risques importants suivant le type et la robustesse de la structure de la couche limite prévalente ces jours-là. Dans ces deux cas, la pression peut soit augmenter soit décroître mais de manière beaucoup moins significative que dans les autres cas. Cependant le type tempéré sec génère des conditions de risque fort par le biais d'une augmentation importante de la vitesse du vent à l'inverse du type tempéré humide, certainement beaucoup plus stable. La Figure 2.63 propose une image de synthèse de ces critères. Ce schéma indique comment pour un type de temps donné, les paramètres pression atmosphérique et vitesse du vent se comportent lorsque le niveau de risque associé à ce type de temps augmente fortement. Ainsi, dans le cas du type tempéré sec, nous allons noter une augmentation manifeste du risque lorsque la pression se met à baisser et la vitesse du vent à augmenter. Il en est de même pour les types, tropical humide et de transition.

En revanche, dans le cas de la situation très rare certes mais fortement pollinique du type tropical sec, alors le risque augmente avec une augmentation de la pression et une baisse de la vitesse du vent. La situation est typique d'un anticyclone chaud et stable. Il en est de même pour le type polaire humide. Enfin, il existe un panache dans le cas du polaire sec par exemple qui voit les risques augmenter lorsque pression et vitesse du vent augmentent, caractérisant l'arrivée d'une situation anticyclonique froide et inversement dans le cas du tempéré humide, lorsque la pression baisse et la vitesse baisse également. Dans ce cas là, si l'on se réfère à la description donnée par Sheridan dans l'Annexe 2.5, on remarque que les conditions de fort risque sont donc associées à une accentuation de la léthargie caractéristique de ce type de temps, soit une augmentation de la stabilité dans les basses couches, accompagnée d'augmentation de l'humidité et d'une dégradation probable de la visibilité.



La situation est typique des conditions de smog et de mauvaise circulation. Les polluants sont enfermés sous ce couvercle au même titre que les pollens.

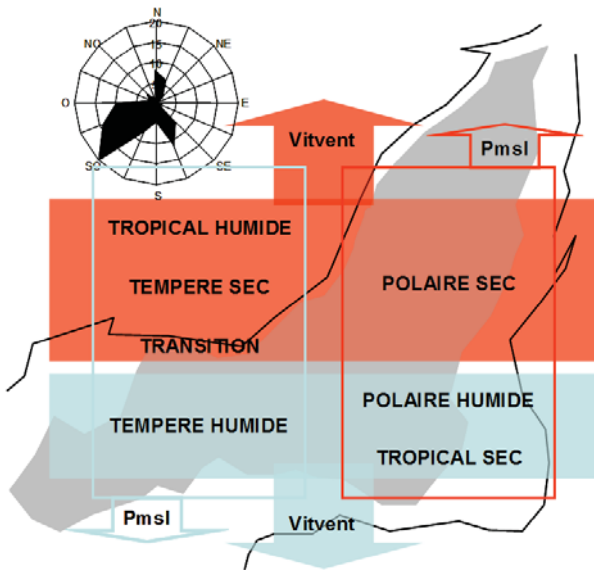


Figure 2.63 : Représentation schématique du comportement des deux paramètres météorologiques les plus déterminants du passage d'un risque faible à un risque fort en vue de l'annonce d'un risque croissant

Le facteur vent étant ainsi un bon indicateur, nous avons voulu illustrer ce qu'il se passe avec la direction de celui-ci et à l'occasion d'un type de temps donné lorsque le risque. Les roses de vent produites à cet égard sont présentées à la Figure 2.64. Elles ont été dessinées en tenant compte des niveaux de risque et des types de temps responsables. Certaines tendances apparaissent tant par type de temps qu'en nous déplaçant d'un niveau de risque faible vers un risque plus important.

Dans le cas du type tropical sec, sa provenance est essentiellement du SO et il peut arriver dans le cas du risque majeur de voir cette orientation quelque peu fluctuer et présenter à quelques rares exceptions une composante du Nord. Le cas du type tropical humide de composante fortement du Sud aussi, autant de l'Est que de l'Ouest, montre une accentuation de la direction SO plus le risque augmente. Dans le cas du type tempéré sec, la composante de Sud et d'Ouest est bien marquée mais avec un panachage plus grand de vents provenant aussi du NE et du SE. Il y a cependant un renforcement de la direction Ouest à l'occasion des risques élevés. Le type de temps de transition offre une variabilité de direction importante d'autant plus marquée que le risque augmente. Dans le cas du type de temps tempéré humide, la composante d'Ouest est plus accentuée plus le risque augmente. En ce qui concerne enfin les types polaires, tous deux montrent une accentuation de la provenance du Nord mais du NE dans le cas du polaire sec et du NO dans le cas du polaire humide. Il est un élément qui ressort

peu importe le type de temps, c'est l'accentuation de la composante Ouest du vent. La direction d'Ouest, semble être particulièrement déterminante de jours à risque élevé sur la région de Montréal et quelque soient globalement les conditions météorologiques autres. Il s'agit d'ailleurs en termes de fréquence de la direction la plus représentée pendant l'été à Montréal (Figure 2.56).

5.4. Risque et conditions ressenties la veille

Pour finir, la dernière question abordée est de voir dans quelle mesure les conditions atmosphériques de la veille, voir de l'avant-veille, peuvent influencer le risque du jour J.

i. Effets des conditions météorologiques des jours précédents

Le Tableau 2.34 présente les résultats de corrélations de Spearman effectuées sur l'ensemble des données disponibles, sans distinction de niveau de risque ou de type de temps. On peut voir que les concentrations mesurées le jour J sont influencées autant par les conditions de la veille (J-1) que par celles de l'avant-veille (J-2) ou de jours antérieurs. Les paramètres les plus déterminants demeurent les paramètres « thermiques » avec lesquels les corrélations sont positives et significatives. Concernant l'humidité relative et les précipitations, leur effet est sensible mais toujours négativement et les coefficients demeurent faibles. En ce qui concerne le vent, il est difficile d'extraire quelque information.

ALL	JOUR J	JOUR J-1	JOUR J-2	JOUR J-3
TT97-03	-0.071	-0.083	-0.081	-0.067
Tmax97-03	0.250	0.264	0.266	0.265
Tmin97-03	0.169	0.187	0.199	0.207
Tmoy97-03	0.217	0.235	0.244	0.247
Rhmax97-03	-0.109	-0.090	-0.102	-0.093
Rhmin97-03	-0.122	-0.129	-0.124	-0.111
Prec97-03	-0.079	-0.105	-0.100	-0.070
Vitvmoy97-03	0.018	-0.060	-0.066	-0.052
Dirv97-03	-0.051	0.019	0.021	-0.008
Ins97-03	0.173	0.201	0.185	0.192
Pmsl97-03	0.006	0.039	0.051	0.060
DD+597-03	0.216	0.235	0.243	0.247

Tableau 2.34 : Résultats des corrélations de Spearman effectuées sur l'ensemble des données polliniques disponibles à partir des paramètres météorologiques du jour J, de la veille (J-1), de l'avant-veille (J-2) et du jour encore avant (J-3)

Ce type d'information demeurant difficilement exploitable en vue de faire de la prévision, nous proposons, plutôt que d'employer les paramètres météorologiques, de travailler à partir des types de temps, sans distinction cette fois des stations de mesure, les types de temps étant représentatifs d'une journée sur l'ensemble du territoire de Montréal. Il est question de voir s'il existe une quelconque persistance de ces types de temps qui pourrait permettre de détecter avec un peu d'avance, les risques importants.



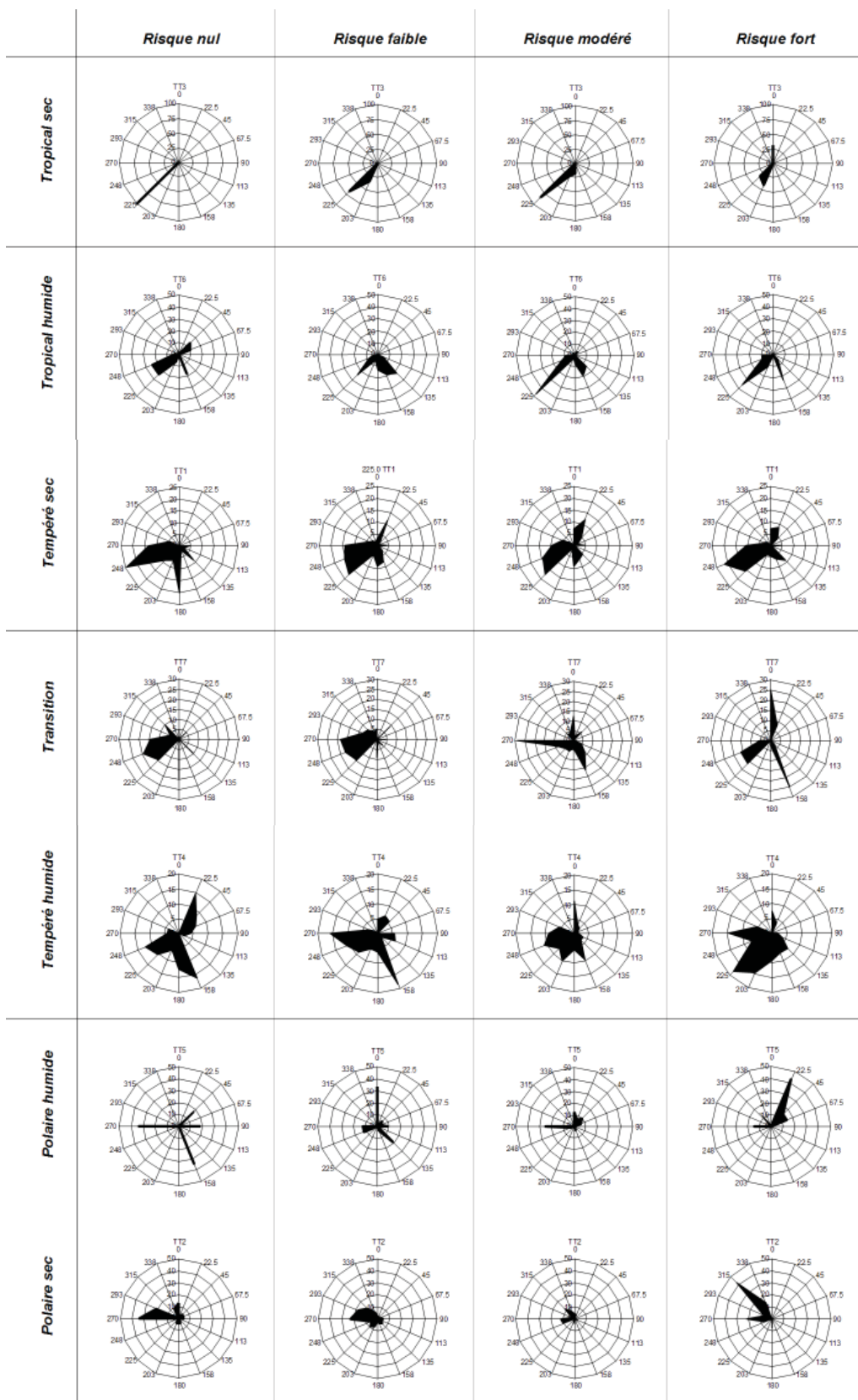


Figure 2.64 : Distribution de fréquence des directions du vent par type de temps et risque

ii. Risque d’allergie et persistance des types de temps

Le risque le plus élevé est le risque majeur (R4) mais comme nous avons pu le voir précédemment, il n’est pas, pour autant, le plus fréquent puisque présent seulement 3% du temps pendant une saison pollinique. Nous allons certes nous intéresser à lui dans cette dernière section mais également aux jours de risque fort (R3) et modéré (R2) qui en dépit de leur dénomination, se situent bien au-delà du seuil clinique donc présentent des risques manifestes pour la population.

Le Tableau 2.35 présente la distribution des types de temps des journées de risque R4, R3 et R2 ainsi que celle du jour qui précède. Dans le cas du risque majeur, on remarque que la distribution des types de temps caractérisant le jour qui précède une journée de risque très élevé est tout à fait semblable à celle dudit jour, à quelques nuances près. En effet, le type de temps tempéré sec, dominant la saison d’ambrosie et dominant des cas de risque R4 est également dominant lors de la journée qui précède. Dans 45% des cas, la journée qui précède un risque très fort est une journée de ce type. En soit, ce n’est pas surprenant du fait de la fréquence importante (près de 40%) de ce type de temps pendant la saison d’ambrosie (Tableau 2.29). Cela revient quasiment à dire qu’une journée sur deux de risque très élevé est annoncée par une journée de type *tempéré sec*.

Fréquence	R4 J	R4-J1	R3 J	R3-J1	R2 J	R2-J1
Tempéré sec	34.5	44.8	44.1	39.5	44	44.2
Polaire sec	3.4	1.7	3.9	7.8	7.6	7.8
Tropical sec	10.3	5.2	2.9	4.6	2.5	3
Tempéré humide	13.8	8.6	15.7	16.3	17.4	16.8
Polaire humide	3.4	3.4	1.6	1.6	3.7	3.4
Tropical humide	20.7	22.4	22.2	21.2	15.6	14.9
Transition	13.8	13.8	9.5	8.8	9.1	10
total	100	100	100	100	100	100

Tableau 2.35 : Distribution des types de temps durant et avant les jours de risques R4, R3 et R2 enregistrés à Montréal pendant la période 1997-2003

En revanche, cette part importante de journées tempérées sèches se fait au détriment de journées de type polaire sec, tropical sec et tempéré humide. En ce qui concerne les cas de situations tropicales humides, elles tendent aussi à être plus fréquentes le jour qui précède. Pour ce qui est des situations de transition, la distribution demeure sensiblement la même que dans le cas du jour de très fort risque. Nous pouvons dire que près de 70% des jours qui précèdent une journée de très fort risque sont, soit des journées de type tempéré sec, soit tropical humide. Concernant les journées de risque fort (R3), remarquons ici inversement, une baisse de la fréquence des jours tempérés secs et tropicaux humides le jour précédent, au profit en revanche, de journées plutôt sèches mais aussi tempérées humides. Concernant enfin les journées de risque modéré, on note aussi une augmentation de

types de temps plutôt secs au dépend de tous les types humides ainsi qu’une hausse des types de transition (changement de temps) le jour qui précède. Ainsi, même s’il est possible de distinguer quelques variations dans la fréquence d’occurrence de tel ou tel type de temps entre le jour J et le jour qui précède, il n’est pas réellement possible encore maintenant de pouvoir annoncer tel ou tel risque pour le lendemain.

Dans le cas du risque majeur, nous nous sommes intéressés à regarder comment se caractérisaient ces journées précédentes les jours de très fort risque en terme de concentrations de pollen. En premier lieu remarquons que sur 58 cas de risques R4, 25 sont précédés par des jours eux-mêmes de même niveau de risque, soit environ 43% des situations. Le fait que cette part relativement importante des journées de très fort risque soit annoncée par une journée de risque semblable est intéressant à noter mais aussi d’autant plus redoutable pour les allergiques. Parmi ces journées, 48% d’entre elles sont de nouveau des journées de type tempéré sec et 16% des cas de type tropical humide.

iii. Persistance du risque dans le temps

Si enfin, plus globalement nous estimons la distribution des journées précédant un jour de risque R4 en fonction non plus du type de temps mais de la classe de risque à laquelle il appartient, c’est-à-dire en tenant compte des quantités de pollen collectés lesdits jours, nous remarquons sur la Figure 2.65, que selon le degré de risque du jour J, le degré de risque du jour J-1 suit une certaine organisation.

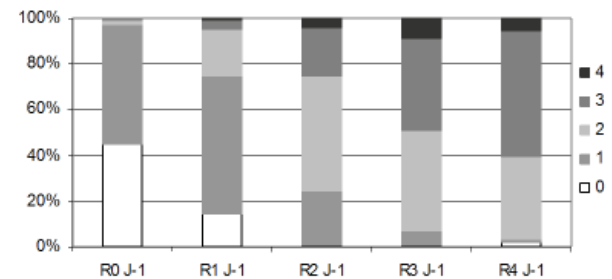


Figure 2.65: Distribution de fréquence des risques le jour J-1 selon le degré de risque du jour J

Il apparaît assez clairement que le jour précédent un jour de risque nul à faible a tendance à être plutôt du même type. Plus le risque du jour J augmente, plus les risques associés au jour qui précède, augmentent aussi, au point qu’un risque 4 est annoncé dans plus de 55% des cas par un risque fort. Le risque modéré est majoritairement annoncé par un risque du même ordre et plus on va vers un risque 4, plus la part de ce risque varie entre 30 et 40% des cas. Nous pouvons extraire de ceci qu’un risque faible voire nul est toujours annoncé par un niveau de risque de même nature mais qu’en revanche un risque

fort à très fort est aussi toujours annoncé par un risque élevé. Ce fait n'est pas surprenant du fait que les risques les plus faibles sont potentiellement, à part exception, des risques de début ou de fin de saison alors que les risques élevés se situent plutôt en cœur de saison. On pourra donc plutôt s'attendre à un risque élevé lorsque déjà quelques jours auparavant on aura atteint des seuils relativement hauts. Une très forte précipitation peut perturber ce schéma en entraînant un lessivage important de l'atmosphère en cœur de saison et en abaissant ainsi le risque à 0 ou 1 mais sans pour autant empêcher que le lendemain n'atteigne des risques très élevés.

Connaissant le risque du jour J-1, nous avons voulu voir si la persistance se maintenait au-delà de la veille et si la connaissance de ce qui s'était passé deux jours avant pouvait être utile (Figure 2.66). Plus le niveau de risque du jour J est faible, plus les risques d'avoir connu des journées de risque élevé précédemment sont faibles. Inversement, plus le risque du jour J est élevé, plus les risques d'avoir connu des journées de risque modéré à élevé est grand. Ainsi, dans le cas du dernier graphique, les journées de risque faible sont quasiment absentes et le risque nul, est inexistant. Plus la veille est une journée de risque modéré, plus les chances d'avoir connu une avant-veille de risque modéré à très fort, sont grandes.

Nous pouvons conclure que, dans le cas du risque très élevé, correspondant aux journées durant lesquelles plus de 300 grains de pollens par m<sup>3</sup> d'air ont été recensés par période de 24 heures, une forte influence de la persistance est manifeste, tant en terme de conditions météorologiques qu'en terme de risque annonciateur. Le type *tempéré sec* prédominant durant la saison de l'ambrosie est prédominant des journées de risque R4 et prédomine également celles qui précèdent ledit jour (44.8%) des cas. Les types de temps tropical humide (22.4%) et de transition (13.8%) sont également représentés dans les mêmes proportions. La consultation de la distribution des risques pendant ce jour qui précède amène à la conclusion que dans le cas de risques modérés à très forts, près de 85% des journées qui précèdent sont de même niveau de risque. Cette proportion tend à augmenter plus le risque est fort le jour J. Dans le cas d'un risque majeur le jour J, plus de 60% des cas qui le précèdent sont partagés entre R3 et R4. La persistance des jours de risque semblable et de types de temps semblables, semble être une caractéristique exploitable en vue de la prévision des risques majeurs à court terme.

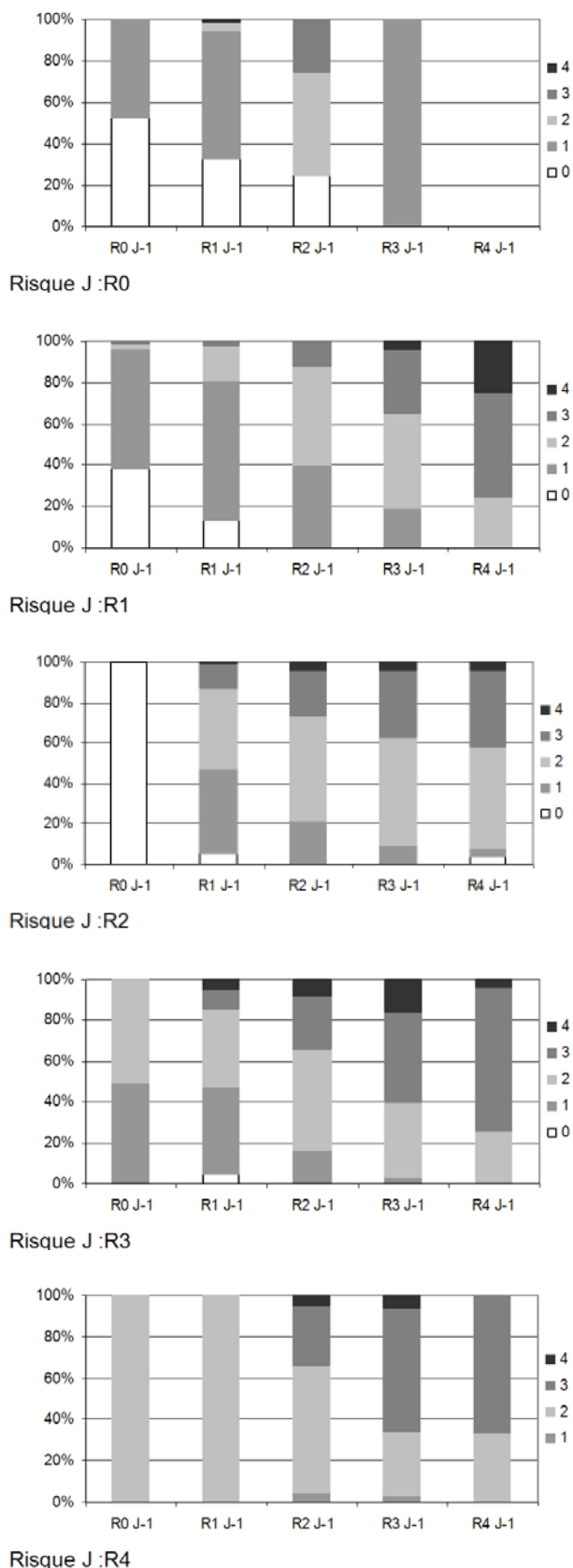


Figure 2.66 : Distribution de fréquence des niveaux de risques de l'avant-veille du jour J en fonction du niveau de risque du jour J et de celui de la veille

## 6. Comportement du nuage pollinique de fin d'été à Montréal

Un vaste tour d'horizon a été réalisé à l'occasion de ce chapitre 2 dont la vocation était de dépendre à l'aide d'approches statistiques conventionnelles, les conditions de la pollinisation de l'ambrosie à Montréal à partir de données issues de 4 stations de mesure pollinique et des données météorologiques de l'Aéroport International Pierre-Elliott Trudeau de Montréal pendant les années 1994 à 2003.

Dans un premier temps les échantillons polliniques disponibles ont été décrits, ce qui a permis de mettre à jour tant des similarités que des disparités de comportement entre les stations et entre les années de la décennie à l'étude. La co-variation entre les sites est acquise mais en dépit de ceci, la distribution des quantités de pollen mesurées est significativement différente au cours d'une même année, d'un site à un autre. Par ailleurs, chaque année a un impact particulier sur les quantités mesurées. Il en a résulté l'identification de trois entités spatiales.

La première, la station Ouest, présente toujours les comptes totaux et les maxima les plus forts. En moyenne, il sont 3 fois plus importants qu'ailleurs. De ce point de vue, cette station est totalement à part. Les comptes totaux y sont en constante progression mis à part l'exception de l'année 2002, à l'inverse des maxima qui tendent à diminuer avec le temps depuis 1999 et 2000, années durant lesquelles ils ont atteint des paroxysmes. Cette station, située au cœur d'une source abondante d'ambrosie doit probablement une bonne part de ses caractéristiques à sa situation.

La seconde entité est la station Ville Lasalle. A l'inverse de la station Ouest, elle enregistre les plus faibles concentrations totales mais est en revanche en très nette et régulière augmentation entre 1994 et 2002. En l'espace de 9 ans, elle a vu ses comptes passer du simple au triple et ses maxima quasiment doubler. L'année 2001 est ici celle qui est la moins en phase avec les autres années. Elle était déjà spéciale à l'Ouest, à VL elle se traduit par une absence de pic unique mais une succession de quelques pics de plus faible ampleur. Il s'agit aussi de la station dont nous disposons de la plus faible quantité d'informations concernant sa localisation et la méthode d'échantillonnage. Aussi, un certain nombre de questions se posent quant à son évolution dans le temps et les raisons de celle-ci.

La troisième entité regroupe en fait les deux derniers sites, Centre Ville et Est, qui se comportent de manière assez similaire. Les pics polliniques sont d'un ordre de grandeur assez semblables même si les totaux sont quelques peu différents avec des comptes globaux plus abondants dans

l'Est. Les comptes polliniques du Centre Ville sont par ailleurs toujours un peu plus abondants qu'à VL à part en 1998 et 2001, années pendant lesquelles les totaux sont comparables et en 2002 qui inverse la tendance. On note une certaine stabilité de ces comptes au CV durant la décennie étudiée alors que la tendance est à la baisse dans l'Est.

Finalement, d'un point de vue pollinique, les années 1997 et 1998 sont probablement d'envergure semblable, 1999 très pollinique tend à s'achever relativement tardivement, l'année 2000 est assez proche de 1999 à la différence près que le pic est atteint plus rapidement cette année-là, 2001 se caractérise par une succession inhabituelle de pics de moindre envergure après un démarrage hâtif et fort en août, l'année 2002 est spéciale du point de vue des comptes polliniques obtenus dans les 4 sites et 2003 semble être une année de reprise bien marquée dans l'Ouest notamment. Globalement les années les plus polliniques de la décennie sont la succession des années 1998 à 2001.

Cette description des années polliniques nous amène à nous poser la question de l'évolution des valeurs extrêmes et des risques associés. Il a pu être déterminé que peu importe les conditions atmosphériques de printemps (notamment températures et précipitations) qui influencent les quantités saisonnières totales (Comtois et Sherknies, 1989) et peu importe celles du moment qui génèrent des disparités au jour le jour, sur une base saisonnière et régionale, il existe une relative similitude en moyenne, de la distribution du nombre de jours se situant au-delà de certaines valeurs de percentile saisonnier données. En revanche, les sites pris au cas par cas, se comportent différemment les uns par rapport aux autres. Ces valeurs ont ensuite été analysées du point de vue du risque qu'elles font encourir à la population. Pour ce faire, les quantités mesurées sont converties sous la forme de classes de risque telles que définies et employées par la ville de Montréal. Le risque majeur, le moins fréquent est évidemment, la plupart du temps, associé à la station Ouest, éventuellement à celle de l'Est et exceptionnellement récemment à Ville Lasalle. La tendance à l'augmentation du risque avec le temps est réelle à Ville Lasalle. Inversement le nombre de jours de risque nul décroît d'année en année. Le risque modéré est assez stable et le risque fort tend à augmenter aussi. Les autres stations ne montrent pas de tendance aussi marquée mais il existe cependant une tendance à l'augmentation du risque fort (R3) et nul (R0) dans l'Ouest, l'Est et au Centre Ville. Nous pouvons éventuellement imaginer que cette observation est liée à un allongement progressif des saisons de pollinisation. Les journées de risque majeur affectent plus largement l'Ouest de l'île et semblent augmenter en nombre également. Ceci nous incite à penser que la variabilité inter journalière pourrait augmenter et entraîner un passage plus fréquent de journées très à risque



à d'autres de risque nul ou faible, donc une augmentation des situations extrêmes. Dans l'Est et au Centre Ville, les conditions semblent inversement s'améliorer pour les allergiques avec une baisse manifeste du nombre de journées de risque fort à majeur. Globalement retenons aussi qu'à l'échelle de l'île de Montréal, même si disparités il y a entre les sites, sur une base régionale, chaque année apporte son lot équivalent de journées dont le risque est compris entre 1 et 3. La variabilité est plus grande avec les extrémités de cette échelle.

A ces conditions polliniques, s'associent des conditions météorologiques qui ont pour effet de moduler les précédentes. Une analyse de ces conditions permet de définir différents types de printemps et d'étés. La distribution des paramètres thermiques, de l'humidité, des précipitations (types et durée) de même que la pression atmosphérique et l'ensoleillement a été analysée. Un certain nombre de relations ont pu être identifiées avec les années polliniques correspondantes. Nous en faisons une petite synthèse récapitulative. Concernant la pluviométrie annuelle (entendre printemps et été), bien que relativement homogène en terme de nombre de jours durant la décennie étudiée puisque l'été compte en moyenne 35 jours de précipitations, on note toutefois une tendance vers un assèchement très marqué au cours des plus récentes années. L'été est en moyenne de moins en moins pluvieux comparativement à la normale (nombre de jours) de saison et de plus en plus sec (quantité de précipitations). En effet, le nombre moyen de jours de précipitations en août est significativement à la baisse comparativement à la normale 1971-2000. On note parallèlement une augmentation du nombre d'événements extrêmes ( $\geq 25$  mm) au printemps de même qu'à la fin de l'été. En terme de quantité, à partir de 1998 et jusqu'à la fin de la décennie, à part en 2000, les années (printemps et étés) se trouvent bien en deçà des valeurs normales. Les printemps 1998, 1999, 2001 et 1995 ont particulièrement manqué d'eau mais ce ne fut pas le cas de 2000, 2002 et 1996. Les étés 1998, 1999, 2000, 2001 furent très secs. On peut dire que l'on note depuis 1998, une récurrence d'années particulièrement sèches. A propos du champ de vent, la moyenne de la vitesse du vent durant la période étudiée est toujours supérieure à la normale de saison. Les années 1999 à 2003 sont particulièrement venteuses en août et de 2000 à 2003 en septembre. En été, à part en 1998, toutes les autres années montrent une augmentation significative de la vitesse du vent d'année en année. En terme de direction, le quart SO est dominant en août avec une forte occurrence également du quart NE en 1994, 1995, 1999, 2002 et 2003 et du quart NO en 1996, 1997, 1998 et 2000. Le mois de septembre présente moins de régularité, toutefois dans 9 cas sur 10, le SO domine à part en 2001. Nous pouvons relever une tendance aussi à l'augmentation de la fréquence des vents du NE, surtout sur la fin de la période.

Enfin, concernant les types de temps, nous avons vu qu'il demeurait somme toute difficile d'attribuer les situations les plus à risque, c'est-à-dire les plus polliniques à des types de temps très spécifiques. On peut dire globalement que la saison pollinique de l'ambrosie est marquée par une récurrence assez régulière d'un certain nombre de types de temps et que tous peuvent être potentiellement à risque suivant les cas. Certains d'entre eux le sont du fait de leur fréquence d'occurrence importante associée à une charge pollinique moyenne comme c'est le cas du type tempéré sec, d'autres le sont du fait de leur charge pollinique propre plus que de leur fréquence qui est néanmoins relativement importante comme c'est le cas du type tropical humide par exemple ou d'autres le sont aussi, mais il s'agit d'un cas extrême, du fait de leur charge pollinique particulièrement élevée en dépit d'une occurrence extrêmement faible, comme dans le cas du tropical sec. Toutes les associations sont en fait possibles mais on peut globalement les synthétiser ainsi. L'association des types de temps tempéré sec, tropical humide et de transition, lorsqu'ils sont tous trois associés à une forte augmentation de la vitesse du vent, des températures assez chaudes ainsi qu'une baisse de la pression atmosphérique et de l'insolation, explique près de 66% des cas de passage de risque faible à modéré à un risque fort à très élevé. Il en va de même dans 22% des cas avec les types de temps tropical sec et tempéré humide lesquels se caractérisent par une baisse de la vitesse du vent, une augmentation de la pression et de l'insolation. Enfin, les 13% des cas restants, s'expliquent par l'association des deux types de temps polaires associés à une légère augmentation du vent ainsi qu'une augmentation de la pression et de l'insolation.

Afin de traduire ceci dans un langage plus météorologique, disons que les types de temps tropical humide et éventuellement de transition, sont plus ou moins associés au passage d'un front chaud, système le long duquel l'air froid recule. De ce fait, l'ascension de l'air chaud se fait sur une plus longue distance à l'avant du front (Leduc et *al.*, 1985). Le type tropical humide (TT6) pourrait être associé au passage du front. Il s'agit en fait de remontées d'air chaud et humide en provenance du Sud des Etats-Unis. Le type de transition (TT7) correspond au temps d'alternance, lorsque les masses d'air se succèdent sans nécessairement se ressembler. Le type tempéré sec (TT1) pourrait correspondre à la phase qui précède l'arrivée du front, des situations plus ou moins anticycloniques suivant les cas, suivi du tempéré humide (TT4) qui ferait suite à ce passage. D'après les descriptions des types de temps polaires, il est possible d'associer le type de temps polaire humide (TT2) à l'arrière d'un front froid qui par définition est la zone délimitée par l'avance de l'air froid qui du fait de sa densité pousse l'air chaud à s'élever en se glissant sous lui. La vitesse du front est plus rapide que celle du front chaud. Elle peut toutefois être quelque peu ralentie au sol sous l'effet de la rugosité de la surface.



Du fait de la circulation cyclonique, l'air froid du Nord se retrouve dans la partie Ouest ou SO de la dépression. Le type de temps polaire sec (TT5) est quant à lui potentiellement attribuable à une situation anticyclonique froide, avec des vents venant plutôt de l'Est et du NE, des températures maximales particulièrement fraîches pour la saison. Enfin, le type de temps le plus extrême est le type tropical sec, excessivement chaud, sec, moyennement venteux du SE au SO et tendant à l'être moins encore lorsque le risque augmente, associé potentiellement à des conditions anticycloniques chaudes. Dans ce cas d'anticyclone, c'est la dynamique qui est le plus important facteur et la subsidence s'opère sur une très grande échelle. Le temps est chaud, beau et change peu sous de telles conditions.

Ainsi nous pouvons dire que les risques les plus importants dans chaque type de temps, sont selon les cas plus ou moins liés à l'un ou l'autre des paramètres présentés. Il est possible de caractériser ces 4 types de temps et l'occurrence de risques majeurs de la façon suivante. Dans tous les cas les risques les plus forts sont associés à des brises légères (ex. tropical et tempéré sec) à modérées (tropical humide), voir fortes (transition), et par temps chaud. La plupart du temps, les risques les plus importants apparaissent lorsque le thermomètre dépasse les 28 à 30°C et plus. Enfin, concernant la direction du vent, elle est plus difficile à interpréter. Dans le cas du type tropical sec, les maxima sont associés à tous les vents venant du quart NE. Dans le cas du type tempéré sec, les plus forts sont issus du SE, dans celui du type tropical humide, les vents du Sud mais aussi les occurrences du NW au NE sont susceptibles d'y contribuer et enfin, lorsque le temps change c'est essentiellement toute la moitié Sud du quadrant qui est en cause avec notamment le SSE. Cela confirme le fait que le paramètre météorologique le plus déterminant des concentrations polliniques et ce, quelque soit le site de mesure est la température du jour même mais aussi celles des jours précédents, jusqu'à 2 ou 3 jours selon les cas. Ce résultat avait déjà été trouvé précédemment par Comtois et Sherknies (1991) ou encore Raynor et Haynes (1970). Les températures semblent en effet être le meilleur critère qui pourrait, selon Comtois (1995), additionné aux probabilités de précipitations, permettre de prédire avec un succès de 87% les concentrations polliniques. Par ailleurs, le site Ouest présente aussi une corrélation positive et significative avec la vitesse du vent qui pourrait laisser entendre que ce site est plus souvent que les autres sous l'influence du transport longue distance. Nous avons déjà avancé ce point lié à sa localisation, à l'extrémité occidentale de l'île. Outre le fait de se trouver dans une source d'ambrosie, il est aussi soumis aux vents chargés de pollen venant du Sud et agit telle une porte laissant entrer les flux polliniques du Sud. Une dernière question a ensuite retenu notre attention. Elle concerne la persistance des types de temps et des

risques. Il semble que l'on puisse convenir d'une relative persistance des types de temps d'un jour sur l'autre et que par ailleurs, plus le risque est élevé, plus le risque du jour qui précède tend à l'être aussi. Dans tous les cas, le type de temps tempéré sec est largement prédominant.

Le chapitre suivant propose une approche déterministe portant sur la même problématique. Quelques situations typiques seront analysées de manière à identifier dans le temps et dans l'espace le développement de la couche limite atmosphérique et donc le comportement du pollen. Nous n'avons pas identifié en effet entre les sites de différences significatives de la distribution des risques, ce qui ne veut pas dire pour autant qu'il n'en existe pas. En effet, les données d'observations étant des valeurs quotidiennes et ponctuelles dans l'espace il demeure difficile d'en tirer une information de nature plus spatiale. Le MRCC devrait permettre d'entrer dans le détail de ces situations, de manière à estimer si les risques importants générés par ces différentes situations ont la même portée spatio-temporelle les uns les autres.

---

## CHAPITRE 3 – APPROCHE DÉTERMINISTE

*Si l'observation in situ et l'analyse statistique des données offrent une image cohérente et intéressante des risques polliniques potentiels au dessus d'une région donnée, seules des analyses plus poussées à l'aide d'outils numériques plus perfectionnés intégrant les principes fondamentaux de la physique de l'atmosphère tels les modèles régionaux du climat peuvent offrir l'occasion d'analyser avec un détail spatio-temporel inconnu jusqu'alors, le comportement d'un nuage pollinique simulé qui se veut être aussi proche que possible de la réalité. Après un historique du développement du modèle numérique utilisé et une description de cet outil et des améliorations qui lui ont été apportées en vue de la prise en charge du pollen, les différents paramètres spécifiques à ces « simulations pollen » sont abordés. La méthode par emboîtement multiple permet de simuler le comportement du nuage pollinique de l'ambrosie sur une grille de 60X60 nœuds de calculs distancés chacun de 1 km. C'est-à-dire qu'à tous les kilomètres et sur 25 niveaux dans la verticale, un grand nombre d'informations est disponible de nature tant météorologique que pollinique qui permet de suivre le nuage en détail. Les sauvegardes sont réalisées toutes les 15 minutes ce qui offre l'énorme avantage de pouvoir étudier l'évolution du nuage dans le temps avec une précision jusqu'alors impossible avec la seule observation sur le terrain et les techniques d'échantillonnage disponibles. La trajectoire aérobiologique est reproduite dans sa totalité dans le modèle, de l'émission, jusqu'à la déposition du pollen en passant par sa dispersion. L'émission est prescrite suivant une carte de localisation des sources recensées sur le terrain par Collins (1991) et tient compte pour la détermination des flux, de paramètres issus de la littérature. Elle est régulière et invariable pour un point donné. Une fois le pollen pris en charge par l'atmosphère, il est soumis à la structure thermodynamique de la couche limite atmosphérique. Une situation typique de fin d'été est simulée et analysée. Elle permet de voir à quel point de petites variations des conditions atmosphériques peuvent affecter le développement du nuage de façon significative et de fait, les zones touchées par des niveaux de risque plus ou moins élevés.*

---



## CHAPITRE 3

L'observation de phénomènes in situ suivie de l'analyse statistique des données de pollen mesurées sur le terrain, offre un ensemble de réponses et méthodes déjà exploitées et commentées dans la littérature (Chapitre 1). Les résultats obtenus dans le chapitre 2 bien qu'intéressants laissent apparaître des limites quant à l'interprétation possible des résultats obtenus par le biais d'analyses de ce type ainsi et surtout qu'en terme de niveau de compréhension des phénomènes explicatifs eux-mêmes. Nous avons mis à jour le fait que certains types de temps sont plus à risques que d'autres durant la saison de pollinisation de l'ambrosie dans la région de Montréal suivant leur fréquence d'occurrence ou aussi suivant leur poids dans la balance de la charge pollinique totale, sans que nous ayons pu pour autant identifier clairement un plus qu'un autre. Il n'est ainsi absolument pas possible sur la base de ces résultats de tirer des conclusions fermes sur les relations entre niveau de risque et types de temps à Montréal pendant la saison de l'ambrosie. Les explications que l'on est en mesure d'apporter sont essentiellement descriptives. De telles approches présentent donc des limites dont il faut être conscient lors de l'interprétation des résultats. Ces limites tiennent à divers aspects. Les unes concernent plus directement les méthodes et conditions d'échantillonnage sur le terrain et le traitement des données polliniques qui suit en laboratoire. Les autres sont relatives au traitement statistique effectué sur ces données ainsi qu'à l'interprétation qu'il est possible d'en faire en accord avec la signification et la résolution de cette base de données.

Concernant les méthodes d'échantillonnages, elles sont nombreuses. On entend par là, la mesure du pollen dans l'air donc le type d'échantillonneur employé. C'est en Angleterre que Charles H. Blackley (1873) mène les premières études visant à déterminer le contenu pollinique de l'air. Depuis, de nombreux échantillonneurs aérobiologiques ont vu le jour. Tous présentent des caractéristiques qui leur sont propres. Certains sont volumétriques comme le Rotorod (développé par W. A. Perkins, 1952) ou la méthode Hirst, comparativement au capteur Durham, gravimétrique, du nom de son inventeur (1946). Quels qu'ils soient, tous ont pour objet d'informer sur le contenu pollinique de l'air mais le net avantage des deux premiers est qu'ils informent également du volume d'air échantillonné. Par ailleurs, la trappe Hirst présente sur le Rotorod l'avantage d'une plus grande efficacité

d'échantillonnage des particules de moins de 10 µm. Par ailleurs son efficacité d'échantillonnage ne décroît pas avec le temps (Subiza, 2001). Ainsi suivant l'échantillonneur employé, il est nécessaire d'adapter le post-traitement des informations en fonction de la signification de l'échantillonnage. Nombre de publications traitent de ces questions (Subiza, 2001). Dans le post-traitement entre notamment la question de la méthode du comptage du pollen. Aucune méthode de mesure standard n'est actuellement disponible. Le choix de telle ou telle méthode de comptage est traditionnellement plutôt historique que réellement motivé par des considérations scientifiques. C'est face à un tel constat que Rogers et Muilenberg (2001) de l'Association Pan-Américaine d'Aérobiologie proposent un protocole standardisé relatif à l'usage des échantillonneurs volumétriques de type Hirst. Ce protocole décrit tant l'installation de l'échantillonneur et sa localisation (de préférence sur un toit plat au moins plus haut que les arbres environnants), que la période d'échantillonnage, le pré- et post-traitement du ruban, montage, installation du tambour et changement, que l'échantillonnage et le flux d'air, la lecture au microscope après découpage et montage sur lame du ruban, que l'identification pollinique et la méthode de comptage et finalement les facteurs de conversion. Une autre difficulté est l'identification pollinique au microscope qui peut entraîner des biais non négligeables. A chacune de ces étapes, il y a risque d'introduction d'erreurs, de mauvaise interprétation. Le fait de développer un protocole standardisé a pour but d'éliminer le plus grand nombre de ceux-ci et de permettre une meilleure utilisation des bases de données polliniques, sur une base d'analyse et d'interprétation commune.

Une fois les données acquises, traduites en comptes polliniques et disponibles pour l'interprétation, alors de nouvelles limites peuvent intervenir. Tout dépend notamment alors de qui traite ces données et dans quel but. A titre d'exemple, il est nécessaire pendant cette étape de prendre considération l'avancée de la saison. En effet, Connell (1969) a montré que la diminution de la sensibilité (mise en premier lieu en évidence sur le pollen de l'ambrosie) associée à la quantité minimale nécessaire pour déclencher une crise, semble diminuer plus la saison avance. Il a aussi remarqué que la concentration requise pour développer des symptômes était significativement plus basse en milieu de saison et en fin qu'en début. Cet

effet « priming effect » a par la suite été reporté pour bien d'autres pollens. Il y a aussi ensuite les facteurs d'ordre génétique qui peuvent influencer le pouvoir allergène d'une espèce dans une région donnée. Il est ainsi parfois possible de trouver des variations régionales des critères allergènes d'une même espèce de plantes ou d'arbres. Le degré de pollution atmosphérique semble aussi de plus en plus incriminé de même que la variation des températures (Behrendt *et al.*, 1992). D'autres études mettent en évidence les effets manifestes et directs de la pollution de l'air sur le degré allergénique du grain de pollen lui-même. Parmi ceux-ci on relève les effets de particules issues de la combustion du diesel sur des pollens collectés à proximité des autoroutes. On parle de « adjuvant effect ». Muranaka *et al.* (1986) l'ont mis en évidence sur le pollen du cèdre japonais. Un certain nombre d'études épidémiologiques ont également mis en évidence une prévalence 2 X plus élevée de ces effets en ville qu'en milieu rural (Ishizaki *et al.*, 1987 ; d'Amato, 2000 ; Diaz-Sanchez *et al.*, 1999, 2000). Par ailleurs, les variations des quantités de pollen pendant la journée ne sont plus à démontrer. Les conditions atmosphériques y contribuent aussi largement. Tous ces critères sont à considérer et il peut arriver que par défaut d'information, l'interprétation soit inadéquate.

Finalement, la méthode de traitement statistique employée est aussi déterminante du point de vue de la validité et de la signification des résultats avancés. La désignation et la justification du type de statistique employée sont cruciales de la compréhension que l'on a des résultats et de l'information que l'on transmet aux intéressés (médiés, médecins, patients, public, chercheurs...). Plus la démarche est réglée et le traitement homogène, moins le risque d'introduire des erreurs est grand.

Il n'en demeure pas moins que l'un des principaux objectifs du suivi pollinique sur le terrain demeure la compilation de bases de données polliniques permettant de rendre possible la prévision de l'occurrence et de la durée de la saison de différents types de pollens ainsi que leurs concentrations. Il est en effet nécessaire de produire quotidiennement des données polliniques transposables et traduisibles en vue de l'information du public sur l'état de la saison pollinique. Pour cela on doit absolument allier une méthode de capture, comptage et traitement rapide et fiable. Cette démarche est particulièrement utile en vue de la gestion des traitements de désensibilisation avant même l'arrivée de ces pollens de même que des traitements de différents maux associés à leur présence (Sanchez-Mesa *et al.*, 2002 ; Frenguelli *et al.*, 1998 ; Galan *et al.*, 1998 ; Arizmendi *et al.*, 1993 ; Peeters, 1998 ; Norris-Hill, 1995 ; Laaidi, 2001). Mais le comptage prend du temps et la journée échantillonnée ne peut être lue qu'une fois passée !

Enfin, un autre élément à considérer est l'utilisation

de données météorologiques provenant de stations météorologiques de référence pour prévoir le comportement des concentrations mesurées dans l'air à l'aide de relations empiriques ou de modèles statistiques. Toutefois, il arrive fréquemment que par mesure de facilité mais aussi et surtout pour des questions d'économie, on utilise pour une région donnée la station météorologique la plus proche ; il s'agit souvent de celle de l'aéroport, afin de caractériser les conditions de la dispersion. Or, suivant le type de région, son étendue, l'occupation du sol, les conditions du milieu peuvent être suffisamment influentes pour perturber le patron météorologique régional. Le fait de se trouver par exemple en cœur de ville ou dans une zone rurale, sur une montagne ou à proximité d'une étendue d'eau, sont autant d'exemples possibles de situations qui peuvent avoir une influence de micro échelle sur les conditions d'émission et de dispersion du pollen. Il ne faut pas non plus oublier la proximité des sources. Habituellement, un inventaire de ces sources devrait être réalisé de manière à être en mesure d'identifier le pollen d'origine locale mais ce n'est pas toujours, ni le cas, ni possible. Il doit aussi être mentionné que la propagation de la plante qui produit le pollen au même titre que son arrachage, demeurent incertains. Quoiqu'il en soit, la mesure sur le terrain n'est absolument pas à négliger car en dépit de ses limites et notamment du fait que l'on doit toujours avoir à l'esprit qu'un grand nombre de paramètres intervenant dans l'analyse des situations n'est pas fixe et est parfois mal connu, elle apporte une information fort utile quant à la diversité des espèces polliniques en présence et aux cycles saisonniers et diurnes de ces espèces en un lieu donné.

La recherche en aérobiologie est cependant maintenant arrivée à un point où elle doit s'efforcer d'intégrer autant que faire ce peut, les phénomènes météorologiques, phénologiques et polliniques en vue d'améliorer la compréhension des phénomènes permettant par la suite d'accroître la précision des prévisions (Kennedy, 1997). Ce chapitre propose d'apporter une contribution à cette étape nouvelle et décisive. La méthode proposée dans la suite de cet exposé se base sur l'utilisation d'un outil numérique complexe, le modèle régional du climat canadien (MRCC'), dans une démarche qui se veut originale et complémentaire de celle présentée à l'occasion du chapitre 2. En effet, afin de parvenir à une meilleure gestion du contrôle des sources de pollen dans une région donnée, une bonne connaissance des facteurs physiques est indispensable. Des outils perfectionnés sont disponibles pour atteindre cette connaissance, parmi eux les modèles régionaux du climat. Plusieurs questions se posent qui nous amènent principalement à nous demander comment il serait possible d'estimer qualitativement et quantitativement les différents étapes de la trajectoire aérobiologique, c'est-à-dire combien de temps demeure le pollen en suspension, sur quelle distance voyage t'il,



quelles sont les conditions qui l'amène à se déposer ? Or du fait de ses caractéristiques de taille en particulier et de nombre, il demeure tout à fait impossible de visualiser son comportement à l'œil nu. De plus, les mesures existantes ne peuvent être que ponctuelles dans l'espace et ne répondent pas toujours à des critères normatifs tel que ceux préalablement abordés et présentent enfin et au mieux, une résolution temporelle de l'ordre de 2 heures. Le pollen mesuré localement n'est pas nécessairement et uniquement d'origine locale ; il peut parfois être délicat de le distinguer du pollen plus lointain surtout dans l'idée d'une gestion appropriée des sources locales. Du point de vue des processus physiques qui interviennent dans sa phase de dispersion, il n'est pas envisageable sur la base des dispositions actuelles de comprendre les phénomènes qui interviennent dans l'espace à trois dimensions et le temps. Il est en effet impossible d'enregistrer actuellement, à part éventuellement pour une expérience à court terme, le comportement du pollen en temps réel puisque l'échantillonnage nécessite un post traitement relativement long. Les raisons sont multiples de vouloir essayer de développer d'autres techniques, d'autres approches qui puissent améliorer cette compréhension. Parmi ces approches innovantes, la modélisation offre une alternative fort intéressante. Elle est complémentaire à la prise de données sur le terrain de même qu'au suivi des sources polliniques. Une fois validée, elle peut en effet fournir une image tridimensionnelle et rapide de la concentration du nuage pollinique au dessus d'une région. D'autres méthodes le peuvent aussi, telle la télédétection par laser (LIDAR).

A cet égard le MRCC offre la possibilité d'utiliser les principes fondamentaux de la physique de l'atmosphère et des particules aéroportées dans le but de développer un nouvel outil complémentaire aux méthodes déjà employées. Ces principes sont à la base, des modèles mathématiques complexes tels que le MRCC. Les méthodes numériques sur ordinateurs permettent aujourd'hui de résoudre les équations de la dynamique des fluides sans contraintes pour une vaste gamme d'échelles spatiales et pour un bon nombre de types d'écoulements (Laprise *et al.*, 1997, 1998 ; Bergeron *et al.*, 1994 ; Caya *et al.*, 1995, 1999 ; Tanguay *et al.*, 1990, Robert). Dans la présente étude nous employons le MRCC pour simuler le nuage pollinique de l'ambrosie au-dessus de la grande région de Montréal. Parmi les années échantillonnées sur le terrain, 7 d'entre-elles sont mises à contribution pour fins de comparaisons avec les simulations et validation de nos calculs.

L'objectif est de parvenir à déterminer l'influence des différentes conditions atmosphériques sur les principales étapes de la trajectoire aérobiologique simulée, c'est-à-dire les conditions d'émission, de transport et de déposition du pollen. Seule l'utilisation d'un modèle atmosphérique à haute résolution peut offrir la possibilité

d'évaluer ces différentes composantes. La stabilité atmosphérique, la turbulence de même que les interactions avec la topographie ou encore la présence de surfaces en eau jouent-elles des rôles significatifs sur la distribution 3-D du pollen dans l'air une fois émis par une source et pris en charge par l'atmosphère ? Les flux turbulents à proximité de la surface sont le reflet de l'état de la couche limite atmosphérique (CLA). Ils sont typiques de quelques dizaines de mètres de la surface à plusieurs centaines de celle-ci en réponse au forçage radiatif à la surface. La CLA connaît à cet égard des rythmes diurnes qui font qu'elle est plus développée au moment le plus chaud de la journée lorsque la turbulence y est la plus forte. Le cycle diurne du pollen de l'ambrosie est par ailleurs bien connu (Raynor *et al.*, 1976 ; Fischbar, 1986 ; Jones et Stillwater, 1952). On peut s'attendre à ce qu'au moment où la CLA est la mieux développée, la dilution du pollen soit la plus grande et la plus homogène. Enfin le transport et la dispersion du pollen sont modulés par les fluctuations du comportement de la CLA de même que son élimination est induite par les processus de lessivage et de déposition associés aux précipitations. Ces processus ont pour effet de réduire voire, éliminer complètement le pollen en suspension. Le schéma présenté à la Figure 0.5, dans l'introduction, illustre de manière simplifiée mais claire, ces différents aspects.

Ce travail a été rendu possible grâce aux développements réalisés par Muñoz-Alpizar et Blanchet (2002). Ils sont les premiers à avoir tenté ce genre d'expérience à partir du MRCC auquel ils ont couplé certains modules d'un autre modèle, le Northern Aerosol Regional Climate Model, noté dans la suite NARCM. Cet outil est décrit avec plus de détail dans la section 3.1. Nous verrons que le modèle employé se compose de deux modules communément appelés en modélisation, l'un la Dynamique et l'autre la Physique. Le cœur dynamique a évolué, a été amélioré au cours des phases de son développement mais nous l'utilisons tel quel dans le cadre de nos expériences. Ce que nous pouvons en revanche faire varier est le cœur physique en y intégrant de nouveaux processus, en faisant varier certains paramètres. Les aspects de la Dynamique seront abordés dans la section 2.1. La section 3.1 s'intéressera plus précisément aux aspects de la Physique liés à la question du pollen. Cela nous amènera à parler de ses potentialités mais aussi des limites inhérentes à son développement actuel que nous aborderons dans la section 3.2. Une fois qu'auront été précisés les éléments de cette technique de pointe, nous aborderons dans le détail les expériences réalisées dans le cadre de cette recherche. Nous ferons référence aux études de sensibilité déjà présentées à la fin du chapitre précédent puis développerons sur cette base, les expériences qui nous amèneront à mettre en avant les apports intéressants du modèle dans la section 4.1.

Dans un premier temps, nous nous intéressons au cycle

diurne. Nous abordons la question de l'évolution spatio-temporelle du nuage d'ambrosie tant dans ses rythmes, que dans ses quantités au-dessus de la région du grand Montréal. Ensuite, il importe de voir comment le modèle se comporte sous tel ou tel type de temps de manière à essayer de comprendre plus en détail comment se comporte le nuage sous ces différentes conditions, à l'aplomb d'une source, à l'amont et à l'aval de celle-ci. Les conditions au centre ville sont particulièrement intéressantes vu la part considérable de la population qui le fréquente chaque jour. Une ville étant par ailleurs un milieu plus chaud, elle a tendance à générer des courants ascendants qui semblent, selon Heise et Heise (1957), protéger le centre urbain d'apports polliniques extérieurs au moins sous le vent de ces flux polliniques. Il nous intéresse d'étudier cette situation à l'aide du modèle. Ensuite, dans une optique de santé publique, il importe d'estimer quelle est la part de pollen local sur celle de pollen extérieur et de voir comment du pollen d'origine plus ou moins lointaine peut venir, à certaines occasions, accroître les concentrations locales. Un autre point est intéressant qui concerne l'étude de l'effet de différents milieux spécifiques sur la propagation du pollen dans l'air et son élimination. Enfin, sachant que le but ultime du développement de ce type d'outil serait de parvenir à plus long terme à établir une prévision pollinique, nous pouvons dès à présent essayer de rendre les résultats des simulations plus conviviales pour l'utilisateur potentiel, qu'il soit médecin allergologue ou patient. Pour cela, il s'agit d'afficher les quantités simulées sous la forme de risques plutôt que sous la forme de concentrations. Nous montrerons comment au cours d'une même journée ce facteur de risque peut évoluer dans le temps et surtout dans l'espace. A cet égard, une étude de cas est proposée dans ce chapitre. Elle porte sur une succession de 2 journées tropicales humides suivies d'une de transition. Ce cas quelque peu extrême, a pour but d'exploiter au maximum les capacités du modèle à simuler en conditions fortement polliniques.

## 1. Modélisation numérique de l'écoulement atmosphérique : le modèle régional de climat canadien (MRCC)

### 1.1. Historique du développement du MRCC

Un modèle climatique est un modèle numérique capable de reproduire les principales caractéristiques physiques et thermodynamiques du système climatique. C'est pourquoi la modélisation numérique du climat a connu un essor sans précédent depuis les années 1950 avec l'émergence des ordinateurs et la croissance presque exponentielle au cours des décennies qui ont suivi, de la puissance de calcul. Il n'en demeure pas moins qu'il s'agit d'une

science appelant des techniques complexes, ceci du fait notamment des exigences à satisfaire telles la résolution spatiale ou les ressources informatiques disponibles permettant de résoudre numériquement et adéquatement le système d'équations. L'intérêt de ces « simulateurs du climat » est de permettre de mieux comprendre le comportement du système climatique ainsi que de le tester dans un environnement perturbé. Ces outils se basent sur un système d'équations mathématiques décrivant les lois physiques de la mécanique des fluides tels que le principe de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement. En faisant varier certains termes de ces équations comme la radiation incidente dans le système par exemple ou encore les concentrations de gaz à effet de serre, on peut tester comment le système climatique se comporte sous d'autres conditions. Plus on complexifie ce système de base, en lui ajoutant de nouvelles équations décrivant d'autres processus, interactions ou de nouvelles composantes, plus il est en mesure de prendre en compte les multiples interactions entre atmosphère et biosphère. Le MCG, modèle de circulation générale, est ainsi un modèle complexe basé sur les principes physiques qui représentent les mouvements de l'atmosphère dans sa structure tridimensionnelle. Il simule le passage de l'énergie dans le système à partir de l'entrée du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère jusqu'à son départ vers l'espace sous la forme de rayonnement de longues longueurs d'ondes (IR). Il simule également les effets de cette énergie sur les différentes composantes du système et calcule les résultats en termes de température, précipitations, humidité dans le sol et autres variables importantes. Le domaine au-dessus duquel on effectue la simulation se voit attribuer une grille dont la taille dépend de l'échelle de la région à l'étude et de la résolution à laquelle on souhaite résoudre un problème en particulier. Du fait aussi de la résolution relativement grossière qui le caractérise, on doit y intégrer un certain nombre de phénomènes physiques sous une forme paramétrée afin qu'ils soient pris en compte tels par exemple la turbulence ou la microphysique des nuages. Il s'agit du modèle le plus complet. A titre d'exemple, précisons que dans ces modèles mondiaux, pour chaque saut dans le temps (environ toutes les 20 minutes) et en chacun des points de la grille horizontale (entre 50 et 300 Km), ces programmes effectuent plus de 100 000 lignes de code. La capacité de calcul est de loin la principale limite de la résolution spatiale et temporelle des MCG. La limite pratique du développement de ces outils est liée à la puissance et au temps de calcul nécessaires ainsi qu'au coût de stockage des résultats, soit le coût de ce type d'outil. Le MCG sur lequel se base le MRCC date de la fin des années 80 et correspond à la seconde génération de MCG (MCGii au Canada). Il offre une résolution plus grande (450 Km), une représentation plus détaillée des caractéristiques et processus ainsi que des paramétrisations plus avancées. Ainsi les valeurs jusqu'ici prescrites de la température de surface des océans, du couvert de glace marine et de

la couverture nuageuse sont remplacées par des schémas qui calculent ces champs de façon interactive (McFarlane *et al.*, 1992 et Boer *et al.*, 1992).

Le développement des modèles climatiques régionaux comme le MRCC est le résultat de l'intégration à sens unique de modèles à domaines limités, les LAM (Limited Area Model) à des modèles de la circulation générale de l'atmosphère, les MCG, dans le but d'affiner l'échelle spatiale afin de simuler le climat dans un domaine plus limité. Ce sont Giorgi and Mearns (1991) au National Center for Atmospheric Research (NCAR) qui ont agi comme pionniers en démontrant la faisabilité d'emboîter un modèle à haute résolution dans un MCG à basse résolution (Dickinson *et al.*, 1989 ; Giorgi, 1990 ; Giorgi *et al.*, 1991). Leur stratégie consistait alors à interpoler des champs d'observation atmosphérique de basse résolution provenant de MCG sur une grille régionale de manière à alimenter le modèle régional avec des conditions atmosphériques variant dans le temps, aux frontières latérales. Il s'avère désormais en effet que les études d'impact nécessaires pour appréhender les effets des changements climatiques sur l'environnement, la société et l'économie, nécessitent de l'information plus détaillée et à une échelle beaucoup plus fine que celle offerte par les MCG. C'est pourquoi, cette technique de couplage offre à l'utilisateur d'effectuer des intégrations de processus physiques à long terme avec une très grande résolution spatiale tout en limitant le temps de calcul. Le MRCC date d'une quinzaine d'années. Laprise (1990) envisage alors d'utiliser le noyau dynamique, basé sur les équations du champ d'Euler (Tanguay *et al.*, 1990) du modèle méso échelle compressible communautaire, MC2, mis au point par Robert et ses collègues au Centre coopératif de recherche de méso échelle (CCRM) (Laprise *et al.*, 1997), comme point de départ de la conception de ce modèle. Le modèle MC2 est décrit par Bergeron *et al.* (1994). Un prototype est mis sur pied entre 1991 et 1994 et publié par Caya *et al.* (1999).

## 1.2. Paramètres et caractéristiques techniques du MRCC

Les variables atmosphériques du MRCC (pression de l'air, température, vent, humidité, précipitations, évaporation, humidité du sol) sont discrétisées sur une grille de type C d'Arakawa, en projection polaire stéréographique à l'horizontale et en coordonnées Gal-chen (Gal-Chen *et al.*, 1975) dans la verticale. Etant donné que MC2 est un modèle régional, il est nécessaire de spécifier les conditions aux limites inférieures et latérales, ce que l'on appelle le pilotage. Cette procédure par emboîtement, spécificité du MRCC comprend deux étapes. La première consiste à piloter le MRCC au moyen d'une série chronologique de champs atmosphériques obtenus de MCGii ou encore des données de ré-analyses de type NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996) ou ECMWF, à savoir

les composantes de pression, température, vapeur d'eau et vent horizontal aux limites externes. Pression de surface et autres variables atmosphériques sont emboîtées aux frontières latérales. Les conditions gouvernantes sont amorties dans une zone tampon, l'éponge, périphérique et de largeur variable dans laquelle les champs pilotes fusionnent avec les champs du MRCC progressivement. Cette zone se trouve aux frontières latérales du grand domaine de manière à ce que le reste du domaine ne soit en aucun cas affecté par ce couplage (Caya *et al.*, 1999). Par ailleurs dans le but d'empêcher toute dérive climatique de la pression de surface, la valeur moyenne de celle-ci pour le domaine, au niveau inférieur du modèle, est intégrée à la valeur correspondante variant dans le temps et obtenue à partir des données de pilotage. Les valeurs de pression du niveau supérieur sont ajustées en conséquence. Une fois que les variables ont été ajustées du point de vue dynamique, le modèle génère ses propres conditions du temps à haute résolution de même que son climat grâce à ces informations intégrées aux frontières. Denis *et al.* (2003) ont montré les capacités du modèle à générer les caractéristiques météorologiques de fine échelle à l'intérieur des domaines couplés. Dans la seconde étape de la procédure, il s'agit de spécifier les champs géophysiques et autres champs adaptés pour la grille du MRCC sur la frontière inférieure. Dans notre cas, il s'agit des paramètres polliniques. Cet ensemble de paramètres peut comprendre des quantités fixes ou variant dans le temps.

L'ensemble de la procédure globale par emboîtement est uni-directionnelle. Le MRCC ne modifie en aucun cas les conditions issues du MCGii. Pour résumer, les trois composantes majeures qui le caractérisent sont :

- ✓ le noyau dynamique de MC2 basé sur les équations d'Euler non hydrostatiques et parfaitement élastiques donc utilisables pour toutes les échelles spatiales,
- ✓ un ensemble de paramétrisations physiques du GCMii (Mc Farlane *et al.*, 1992) résolues par des algorithmes numériques semi-implicites et semi-lagrangiens (SISL) à la fine pointe de la technologie, ce qui le rend beaucoup plus rapide que ses congénères,
- ✓ une série de scripts de lancement pour le pilotage et de diagnostics permettant de gérer un nombre important de données simulées ou observées.

Depuis et en plusieurs phases, un certain nombre d'améliorations lui ont été apportées. Ainsi, la suite des diagnostics a été améliorée de manière à automatiser les opérations relatives à la gestion des données et la dynamique du modèle a été optimisée (Caya *et al.*, 1998). Par ailleurs, 2 simulations de 5 ans ont été réalisées sur

l'Ouest Canadien avec respectivement des concentrations normales et doublées de CO<sub>2</sub> (Laprise *et al.*, 1998) (références plus récentes) et une résolution de 45 km. Elles ont permis de documenter certaines faiblesses du MRCC dont celles liées à la formulation empirique de la couverture nuageuse et les processus convectifs de l'humidité. Les équations du MRCC sont décrites par Caya *et al.* (1995,1999).

L'une des stratégies développées à l'Université du Québec à Montréal ainsi qu'à l'Université de Fribourg est de réaliser des simulations à partir du MRCC, en utilisant des grilles de résolution de plus en plus fine, selon la technique de l'emboîtement multiple successif (« self nesting technique »). Auparavant, les simulations entreprises avec le MRCC s'effectuaient sur un domaine de plusieurs millions de kilomètres carrés à partir d'une grille dont la maille variait entre 50 et 60 km. En utilisant le même nombre de points, on effectue un zoom sur une région particulière, d'ordre de grandeur 60 X 60 km<sup>2</sup> et de résolution 1 km. A cet égard, Goyette *et al.* (2001, 2003) ont montré par le biais de la simulation de deux tempêtes de vent hivernales (Vivian et Lothar) à très fine échelle (1 km) au-dessus de la Suisse, les excellentes capacités du MRCC à reproduire la réalité avec fiabilité au-dessus d'un milieu extrêmement perturbé. A ce niveau de résolution, le pas de temps d'intégration des différentes équations doit être ramené de 20 minutes à moins de 1 minute de manière à suivre correctement l'évolution des flux atmosphériques et de la turbulence et à ne pas générer d'instabilité numérique. Ceci impose certes de sérieuses restrictions quant à la durée globale de la simulation effectuée tant en termes de mémoire qu'en termes de temps de calcul.

Ainsi, les MRC à haute résolution constituent désormais des outils essentiels à la modélisation du climat et bien que demeurant aussi coûteux que les MCG en ce qui a trait à leur développement et leur utilisation, ils permettent en revanche d'atteindre des résolutions beaucoup plus fines que les précédents.

## 2. Modélisation numérique du pollen

### 2.1. Introduction du pollen dans le MRCC et naissance du MRCC-Pollen

Dans le cadre de cette recherche la version du MRCC qui est employée et que nous appelons MRCC-Pollen, a été développée dans le cadre du projet NARCM (Northern Aerosol Regional Climate Model) et supportée par l'Institut Canadien de la Recherche. L'organigramme de la Figure 3.1 présente la structure de NARCM dans sa globalité. Le MRCC-Pollen se base sur cette structure mais n'en reprend qu'une partie. Il s'agit en fait d'une version simplifiée de NARCM, adaptée pour la simulation

du cycle aérobiologique du pollen de l'ambrosie.

Il faut à cet égard préciser que NARCM est originellement dévolu quant à lui, à la simulation de l'impact des polluants atmosphériques sur le climat des moyennes et hautes latitudes de l'hémisphère Nord. En effet, les forçages radiatifs induits par les aérosols dans l'air sont à l'origine de perturbations climatiques importantes et sont le fruit, à la fois de processus naturels et anthropiques. Ce modèle a été développé au Canada dans le but de comprendre comment le climat est affecté par les aérosols anthropiques. Il est donc le résultat de l'introduction dans le MRCC d'un module intégrant des aérosols et les processus y étant associés. Le module CAM (Canadian Aerosol Module) intègre explicitement les aérosols sélectionnés en fonction de leur taille suivant la méthodologie proposée par Gong *et al.* (1999). Ultimement, il inclura les sulfates, les particules de carbone, les particules organiques, les aérosols provenant des sols et les sels de mer en fonction de 12 classes de tailles différentes. Des processus tels que la nucléation, la condensation, la coagulation, les interactions nuage-aérosols, la chimie atmosphérique de même que les processus de déposition sèche et humide sont paramétrés dans le module CAM. Une belle réalisation de ce modèle est sa capacité à simuler de façon réaliste le spectre de taille des aérosols à la fois pour le soufre et le sel de mer (Spacek *et al.*, 1999).

NARCM possède de la sorte toutes les caractéristiques du MRCC du fait qu'il est le résultat de la combinaison de la dynamique (originnaire de MC2) et de la physique (originnaire du GCMiii) du MRCC auxquelles s'ajoutent les processus physiques et chimiques relatifs aux aérosols venant du module CAM. Il s'agit de ce fait d'un modèle dynamique non hydrostatique à aire limitée dans lequel on introduit la paramétrisation physique des aérosols distribués en fonction de leur taille. L'advection semi lagrangienne traite de manière acceptable le transport atmosphérique incluant les aérosols du fait de leur faible dispersion numérique. Cet ensemble physique inclut la paramétrisation de la radiation solaire et terrestre, celle des nuages convectifs et stratiformes, les précipitations, les flux turbulents verticaux de quantité de mouvement, chaleur, vapeur d'eau et aérosols, les ondes de gravité ainsi que le schéma de surface CLASS du GCMii. Dans le cas actuel, la version du MRCC employée est la version 3.6.1 qui permet entre autre, le pilotage spectral préalable à la procédure d'emboîtement multiple qui apporte une amélioration indubitable des simulations. Il s'agit en fait de piloter les grandes ondes au-dessus du domaine, contrôlant ainsi que la trajectoire des dépressions passe toujours au bon endroit, c'est à dire qu'elle soit en accord avec la réalité.



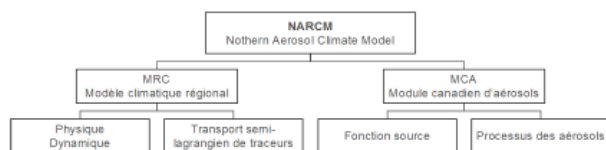


Figure 3.1 : Organigramme décrivant les principaux corps de NARCM adapté et traduit de Gong et al., 2003

Dans le cadre de ce travail visant à paramétrer la trajectoire aérobiologique quotidienne du pollen de l'ambrosie seuls certains modules de NARCM ont été employés. Il n'y avait pas lieu de prendre en compte l'ensemble des aérosols considérés par NARCM. La prochaine section définit plus précisément les conditions du modèle à l'occasion des simulations polliniques.

## 2.2. Emboîtement multiple unidirectionnel et « downscaling »

Simuler le comportement du pollen de l'ambrosie à l'échelle de l'île de Montréal, c'est à dire sur une grille de 60 X 60 km<sup>2</sup> dont les points de grille sont espacés de 1 km les uns par rapport aux autres, nécessite d'effectuer au préalable, une succession de simulations d'échelles plus grandes afin de reproduire correctement les conditions atmosphériques synoptiques et régionales. Le principe utilisé est celui de « l'emboîtement multiple » unidirectionnel parfois appelé « cascade » (angl. « one way self nesting »). Dans le cas présent, pour parvenir au résultat escompté c'est-à-dire à 1 km, le modèle effectue successivement des simulations à 49 puis 7 km de résolution entre les points de grille. Le « downscaling » est le fait de passer de la grande échelle vers la petite échelle, les résultats de la première alimentant la suivante. L'objectif étant d'étudier le comportement du pollen de l'ambrosie à l'échelle de Montréal et de sa proche région, nous avons employé la démarche illustrée à la Figure 3.2.

La première simulation (simulation 1) est exécutée avec une résolution de 49 km entre les points de grille et couvre une région d'environ 3 000 km<sup>2</sup> centrée sur Montréal, soit environ un petit quart NE de l'Amérique du Nord. Cette simulation est pilotée par les données de réanalyse NCEP-NCAR (Kalnay *et al.*, 1996) dont la résolution d'origine est T32/L12 sur une grille de 100X100 km<sup>2</sup> centrée sur les Etats-Unis en projection polaire stéréographique (60°N). La seconde simulation (simulation 2) offre une résolution 7 fois plus grande que la précédente, avec 7 km seulement d'espacement entre les points de la grille. Elle est pilotée par les résultats de la simulation de plus grande échelle, la simulation 1. La région considérée ici fait environ 420 km<sup>2</sup>, toujours centrée sur Montréal. Elle pilote à son tour la dernière simulation à 1 km (simulation 3). A cette résolution, le MRCC est couplé à la topographie de haute résolution du GCMii. En tout, chacune des trois grilles de simulation que nous employons contiennent

108 000 points répartis sur 25 à 30 niveaux de pression dans la verticale et allant jusqu'à environ 30 Km dans l'atmosphère. Les 8 premiers niveaux se trouvent dans le premier kilomètre de l'atmosphère et le tout premier niveau se trouve à environ 20 mètres d'altitude. Les pas de temps auxquels sont faits les calculs en chacun des points dans l'horizontale et dans la verticale ont été ajustés à 900 s, 180 s et 30 s respectivement de la plus grande à la plus fine échelle. Les données sont ensuite archivées toutes les 3 h, 1 h et 15 min respectivement de la grande vers la fine échelle. Une synthèse de toutes ces valeurs est présentée dans l'Annexe 3.1.

Dans le cas des expériences ici présentées le pilotage par couplage des domaines à l'étude avec les résultats de la simulation antérieure ou des données NCEP-NCAR dans le cas de la simulation à plus grande échelle, se fait dans une zone tampon, l'éponge, large de 9 points de grille, sur les abords latéraux de chacun des trois domaines successifs de simulation.

Enfin, lorsque l'on réalise une simulation numérique, il est toujours nécessaire de considérer en début de période simulée, un laps de temps de relaxation et de stabilisation permettant aux différents champs de s'adapter à la nouvelle résolution, ainsi qu'aux conditions de surface de se stabiliser (angl. *spin-up*). Ce laps de temps est de l'ordre de quelques heures à quelques jours dépendamment de la durée de la période simulée. Dans le cas présent, nous avons considéré, lors de simulations de 3 journées à 1 km de résolution, une quatrième journée de « spin up ». Etant donné l'intervalle d'archivage pour chaque simulation variant de 15 min à 49 km, à 3 min à 7 km et enfin à 30 s dans le cas de la simulation à 1 km de résolution, nous avons dû relativement limiter les durées effectives des simulations et ceci essentiellement pour des questions de temps de calcul et d'espace mémoire. A 49 km de résolution, nous simulons entre 1994 et 2003, des périodes de 65 à 70 jours en continu à compter du 15 juillet de chaque été environ. A 7 km, nous avons simulé 50 à 60 jours intégrés dans la période antérieurement simulée à plus grande échelle, à compter du 25 juillet. Enfin, à 1 km, la période simulée est de 37 jours à compter du 10 août de chaque année.

## 2.3. Paramétrage du MRCC et démarche

Toutes les étapes liées à la compilation, à la préparation des données de pilotage, à l'exécution puis au traitement des sorties du MRCC-Pollen sont présentées en Annexe 3.2. La section suivante se concentre sur les paramètres qui entrent en compte dans le cadre des procédures faisant intervenir le pollen.



*Simulation 1*

*Surface couverte : 3000 km<sup>2</sup>*

*Résolution : 49 km*

*Pilotage : Ré analyses NCEP-NCAR*

*Durée : 65 jours*

*Pas de temps : 15 min*

*Archivage : 3 heures*

*Simulation 2*

*Surface couverte : 420 km<sup>2</sup>*

*Résolution : 7 km*

*Pilotage : sorties de la simulation 1*

*Durée : 55 jours*

*Pas de temps : 3 min*

*Archivage : 1 heure*

*Simulation 3*

*Surface couverte : 60 km<sup>2</sup>*

*Résolution : 1 km*

*Pilotage : sorties de la simulation 2*

*Durée : 35 jours*

*Pas de temps : 30 sec*

*Archivage : 15 min*

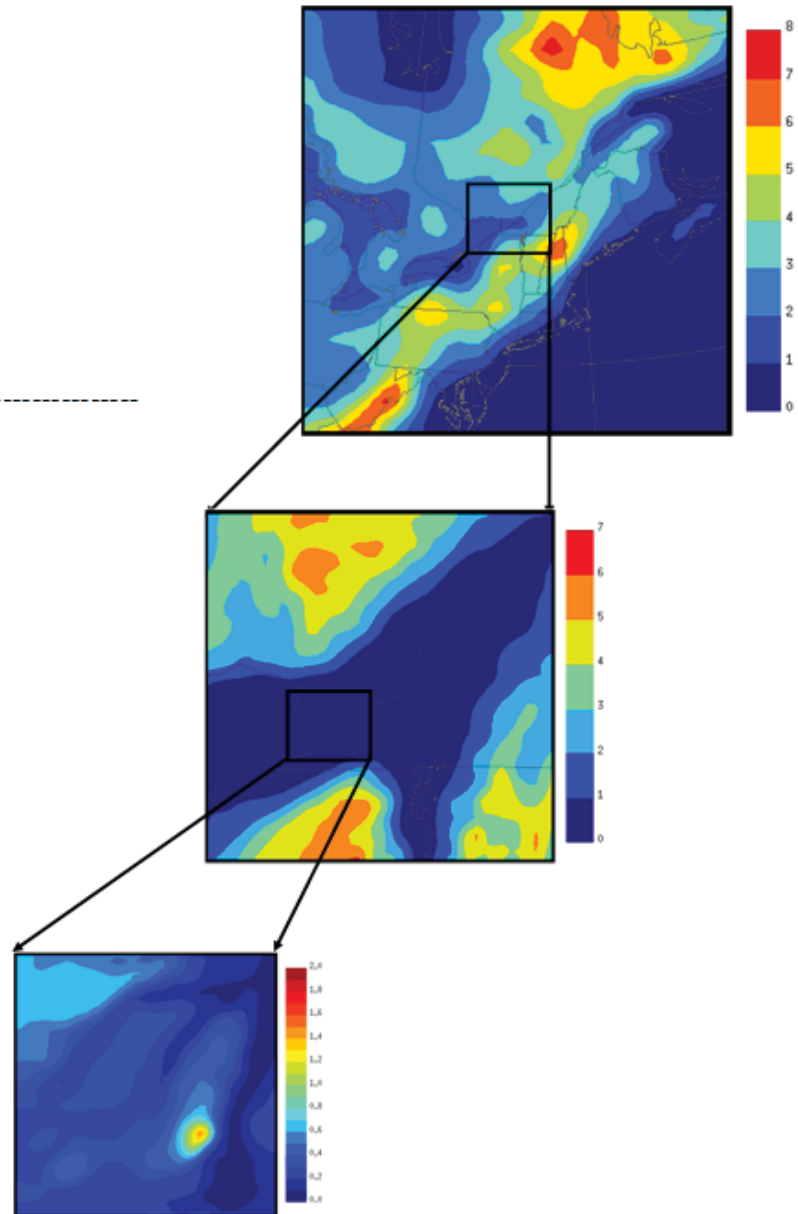


Figure 3.2 : Illustration du principe de l'emboîtement dans le cadre des simulations effectuées dans cette recherche

### 3. Paramétrage du pollen dans le MRCC-Pollen

En ce qui concerne les « simulations pollen » à proprement parler, elles correspondent à la plus fine échelle. Dans le domaine à l'étude, le pollen est subdivisé sous la forme de deux traceurs passifs et indépendants, transportés et soumis aux conditions météorologiques. Le premier traceur provient des sources de l'île de Montréal, on l'appelle « pollen insulaire » et le second du reste du domaine, que l'on dénomme « pollen extra insulaire ». Le principal problème qui se pose avec le pollen est la détermination de la taille et la localisation dans l'espace, des sources de production.

#### 3.1. Détermination et localisation des sources de pollen

Il n'existe pas d'inventaire officiellement disponible de celles-ci à des échelles plus ou moins grandes et donc encore moins à celle du continent Nord Américain. Deux études peuvent toutefois être mentionnées pour l'Amérique du Nord. Il s'agit de Durham (1934) puis Girsh (1982) qui reprend une cartographie existante de 1966 et en propose une pour 1978 et 1979 à l'intention des voyageurs. Il existe de l'information éparpillée d'une région à une autre mais rien n'a encore été, à notre connaissance, cartographié récemment de manière systématique. Il n'en demeure pas moins que nous connaissons l'existence de nombreux cas de pollinoses à l'ambrosie sur toute la frange Est de l'Amérique du Nord notamment. La littérature est abondante à ce propos (chapitre 1). C'est pourquoi, du fait de la non existence de cette cartographie de grande échelle mais dans le but de vérifier la fiabilité de la méthode proposée, le pollen n'est introduit dans le MRCC-Pollen qu'au cours de la dernière étape de la modélisation, lorsque l'on simule le climat à l'échelle locale (1 km de résolution) sur la base d'un inventaire réalisé sur l'île de Montréal par Collins, en 1990 et illustré par la Figure 3.3a. Cet inventaire laisse apparaître trois zones majeures de production. Elles sont localisées dans l'Ouest, à Dorval et dans l'Est, sur des terrains agricoles, terrains vagues ou des friches industrielles de même que le long de certains axes de transport. Une quatrième source moins virulente mais tout de même identifiée, se situe sur les pentes orientales du Mont Royal, c'est-à-dire s'étirant vers l'ENE du centre-ville jusqu'au Saint Laurent. Bien que datant quelque peu, il semble qu'il soit encore tout à fait cohérent avec la situation actuelle selon Comtois *et al.*, 2006 qui confirment que la distribution spatiale de la plante suivait le même schéma en 2005.

Cette cartographie a été digitalisée sur une maille de 1 km dans le modèle de manière à « reconstituer » des conditions d'émission proches de la réalité, en

termes de localisation et densité de plants par unité de surface. A l'intérieur de ce domaine la densité des plants d'ambrosie varie de 0 à 60 par m<sup>2</sup>. Si l'on tient compte de la capacité de propagation de la plante et en contre partie de la politique de la Ville de Montréal en termes de régulation de son extension, nous pouvons nous permettre d'envisager que ces valeurs bien qu'un peu anciennes demeurent d'actualité globalement et en moyenne. Il faut toutefois garder à l'esprit le fait que ces densités peuvent connaître des fluctuations inter annuelles importantes relatives aux conditions printanières de température et précipitations notamment. Selon l'année considérée, le volume saisonnier global de pollen effectivement mesuré peut passer du simple au double voire plus. Il est en effet reconnu que ce sont les degrés jours de croissance qui déterminent l'indice pollinique régional (Comtois, 1992) et les températures et précipitations du printemps qui influencent la somme pollinique annuelle (Comtois et Sherknies, 1989).

Dans les simulations réalisées ici, les principales sources se trouvent donc toutes sur l'île de Montréal. Ce qui n'exclut pas le fait que dans la réalité, il puisse y avoir d'autres foyers virulents hors de ces limites. Toutefois, concernant le reste du domaine c'est-à-dire, l'île de Laval et la frange occidentale de l'Estrie, les sources potentielles étant en tant que telles « inconnues » de façon précise, une estimation a été effectuée en tenant compte du type d'occupation du sol défini à partir de l'imagerie satellitaire de la grande région (Figure 3.3c) par analogie avec ce qui avait été trouvé à l'intérieur de l'île. Ainsi un milieu forestier offre la possibilité d'une densité potentielle d'ambrosie de 5 plants/m<sup>2</sup>, une surface en eau 0, un milieu urbain 10 et une zone agricole 40. A partir de ces valeurs, des estimations sont faites pour l'extérieur du domaine (Figure 3.3b).

Par ailleurs, une analyse préliminaire sommaire de Blanchet (Com. privée, 2002) a permis d'établir que l'on perd la trace d'une source unique entre 10 et 50 mètres de celle-ci. Dès lors, il n'est plus possible de la distinguer de la mesure de fond. Il est donc impossible de déterminer une source unique à une distance de plus de 10 mètres de celle-ci. Ainsi, le choix de travailler sur une maille de 1 km ne nous offre pas la possibilité de remonter à la source ponctuelle mais permet en revanche, d'étudier la formation du nuage pollinique qui dans ce km de résolution est homogène.

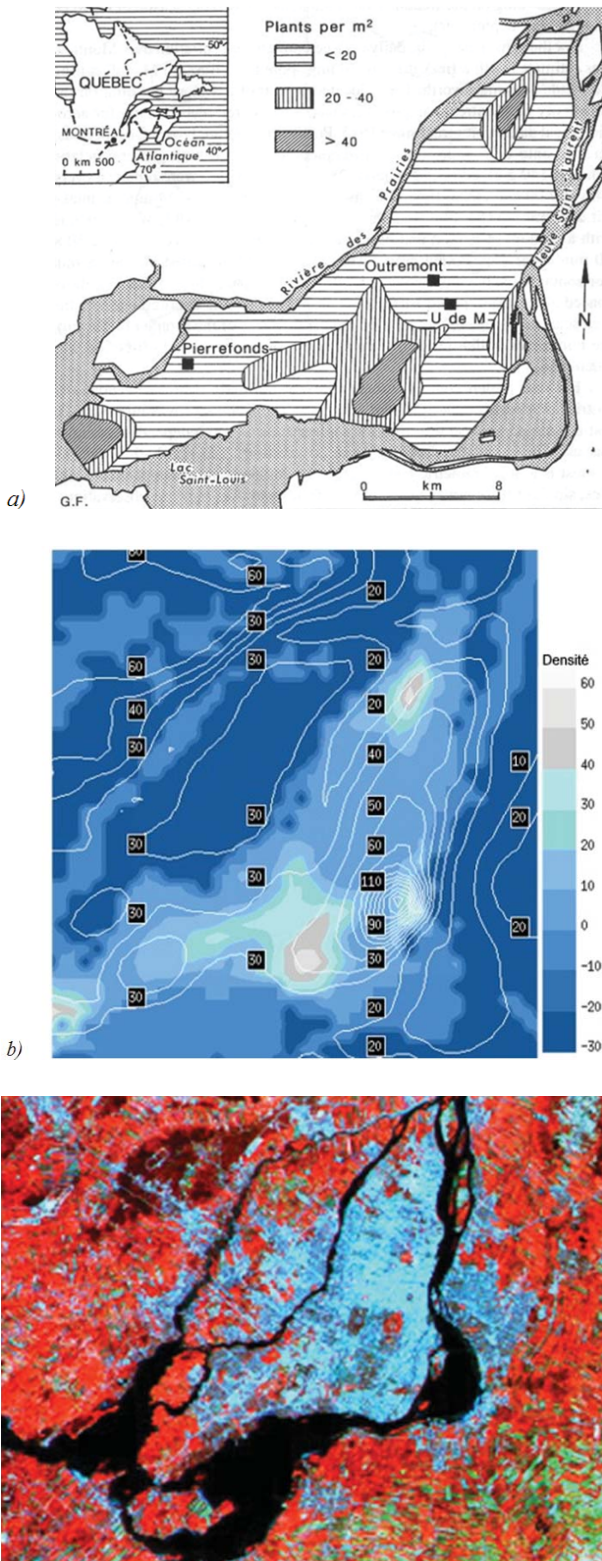


Figure 3.3 : a) Sources d'ambrosie sur l'île de Montréal d'après Collins (1990) b) Sources numérisées dans le MRCC-Pollen sur une grille à 1 Km de résolution (60 X 60) en nombre de plants/m<sup>2</sup> et c) image satellite permettant de déterminer le type d'occupation du sol

Les sources « vues » par le modèle n'étant de la sorte que locales, il n'est par conséquent, pas possible d'envisager la détection de pollen de provenance plus lointaine que

les frontières physiques de la fenêtre. Or il est bien connu que plante a colonisé toute la frange Est des Etats-Unis et que son pollen peut parcourir sans peine des distances de 50 à 100 km voire même plus. Il est donc possible d'imaginer que certaines situations météorologiques typiques de fin d'été telles des journées de flux de Sud puissent apporter dans la réalité des quantités non négligeables de pollen d'ambrosie au-dessus de la région de Montréal. Ces régions du Sud, du SE au SO sont des sources potentielles de pollen extra local pour la grande région montréalaise (chapitre 2), venant contribuer à étoffer le nuage pollinique local déjà dense. Par ailleurs, du fait que l'ambrosie se trouve dans la région Montréalaise pratiquement à la limite Nord de son aire d'expansion (50° de latitude Nord) et qu'entre celle-ci et le 47° de latitude Nord, elle n'est qu'adventice, c'est-à-dire qu'elle a la faculté de s'introduire occasionnellement de façon plus ou moins persistante, mais sans jamais s'installer définitivement, nous pouvons imaginer que dans la majorité des cas de types de temps ayant une de leurs composantes provenant du Nord, le modèle devrait reproduire assez fidèlement la réalité des conditions polliniques en termes de comptes mais aussi et surtout, en termes de distribution et d'évolution spatio-temporelle ; ceci devrait être d'autant plus le cas, que la circulation régionale ne sera pas dominante sur la circulation locale.

### 3.2. Reconstitution du cycle diurne du pollen dans le MRCC-Pollen

Les fluctuations diurnes du pollen d'ambrosie sont bien connues depuis longtemps (Raynor *et al.*, 1976 ; Fischbar, 1986 ; Jones et Stillwater, 1952). La dispersion s'effectue dans la nature tout de suite après l'émission et le patron diurne culmine en milieu de matinée. Le début de l'émission - dispersion a lieu entre 04 :30 et 06 :30. Suit un second accroissement de l'émission entre 06 :30 et 08 :30 (2 heures après le levé du soleil), puis le minimum est de nouveau atteint entre 12 :30 et 14 :30 (Figures 1.4 et 1.5). Le modèle tel qu'il est actuellement paramétré, émet du pollen tous les jours en même quantité pour un point donné et selon des conditions optimales d'émission, c'est-à-dire sans tenir compte des conditions défavorables à son émission. Peu importe le temps qu'il fait ou qu'il a fait les jours précédents ou le printemps précédent, le modèle voit chaque jour la même quantité de pollen émis suivant le patron de distribution des sources de la Figure 3.3b. Ce pollen est paramétré dans le modèle et n'a aucune relation avec les données échantillonnées sur le terrain et présentées dans le chapitre 2. Il atteint son paroxysme entre 07 :00 et 09 :00 HAE<sup>2</sup>. Une fois émis, le pollen connaît un cycle diurne tout à fait réaliste dans le modèle comme le montre la Figure 3.4. Il n'intègre certes pas le passé météorologique récent. Or, comme nous le savons, dans la nature, l'émission du pollen d'ambrosie est conditionnée par plusieurs facteurs d'ordre phénologique et météorologique. Certains d'entre

2 HAE : Heure avancée de l'Est qui en été, du premier dimanche d'avril au dernier dimanche d'octobre équivaut à UTC-4 heures



eux empêchent l'ouverture des capitules tels que les pluies abondantes, comme l'a montré Mc Donald (1964) qui note que 10 mm de précipitations lessivent plus de 96% du pollen contenu dans l'air et jusqu'à 99% si ces gouttelettes passent de 4 à 0.2 mm de diamètre. D'autres en revanche la favorisent, comme l'humidité qui initie la turgescence des cellules et entraîne l'ouverture des sacs polliniques en début de journée (Bianchi *et al.*, 1959) ainsi que des températures relativement élevées et une brise légère à modérée qui aident à la prise en charge du pollen par l'air (Comtois, 1995). A cet égard, Comtois et Sherknies (1991) et Raynor et Haynes (1970) ont montré que les concentrations au jour le jour sont déterminées par la température moyenne de l'air deux jours avant, résultat confirmé dans le chapitre 2. Elles permettent en effet une prévision avec un succès de 87% des concentrations polliniques. De tels facteurs ne sont donc pas encore intégrés dans le paramétrage physique actuel du MRCC-Pollen, en revanche nous sommes assurés que le devenir des pollens est le résultat exclusif des conditions atmosphériques du moment générées par le modèle lui-même. Or, observer, noter comment les conditions météorologiques influencent la dispersion donc le transport puis la déposition du pollen dans le temps et dans l'espace à Montréal est ce qui nous intéresse dans le cadre de cette recherche. En faisant en sorte que l'émission soit toujours constante et indépendante des autres facteurs, on élimine une inconnue et l'on est alors plus en mesure d'estimer la part réelle des effets du climat sur le devenir du nuage pollinique. Enfin, précisons que selon que la source est proche ou lointaine de la mesure effectuée, le patron pollinique quotidien est différent (Raynor *et al.*, 1972, 1974).

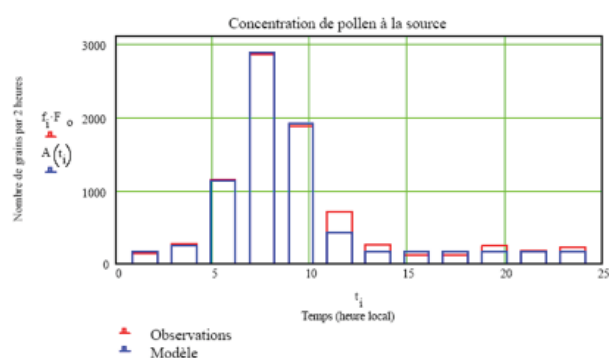


Figure 3.4 : Cycle diurne de la concentration de pollen à proximité d'une source telle qu'observée dans la réalité en rouge et simulée par le modèle en bleu (comm. Perso. Blanchet, 2002)

### 3.3. La trajectoire aérobiologique du pollen dans le MRCC-Pollen

Nombreuses sont les études qui ont montré que les pollens issus de plantes se trouvant à proximité du sol ont tendance à retomber en assez grande quantité dans un rayon relativement court autour de la source d'émission

(Harrington, 1963 ; Raynor *et al.*, 1972, 1974 ; Comtois, 1995). Cette élimination du pollen de l'air est le résultat de différents facteurs soit d'ordre morphologique tel la grosseur des grains, leur masse, leur forme aérodynamique soit d'ordre météorologique comme la vitesse du vent, l'humidité relative, les précipitations (Mc Donald, 1962 ; voir chapitre 1).

Cette dynamique des aérosols impose donc un certain nombre de contraintes vis-à-vis du transport sur des distances plus ou moins grandes. Parmi l'ensemble des pollens émis, un petit nombre seulement est pris en charge par le fluide atmosphérique, par l'intermédiaire de la turbulence. La dispersion est fonction de la hauteur et de la taille de la source mais aussi des conditions atmosphériques prédominantes. Elle peut se comprendre comme étant l'atténuation d'un panache d'émission depuis la source, avec la distance, sous l'effet de deux éléments : la diffusion physique des particules dans l'air et le dépôt des particules au sol. Le pollen est dispersé passivement dans l'atmosphère. Deux notions doivent être considérées. L'une propre au pollen est sa vitesse de sédimentation ou vitesse terminale ( $V_s$ ), caractéristique de la particule, donc constante en milieu non perturbé. Elle traduit la vitesse à laquelle, sous l'effet de la gravité, la particule va toucher le sol. L'autre, le nombre de Reynolds, traduit les conditions atmosphériques liées au transport. Cette valeur est liée à la viscosité de l'air et à la densité du fluide. Il est donc déterminant du patron de dispersion et varie selon chaque situation. Une fois plus haut dans l'atmosphère, les pollens ont la possibilité de voyager sur de plus grandes distances, poussés par le vent en altitude et peuvent ensuite déposer loin de la source en fonction des conditions atmosphériques rencontrées. L'ensemble des processus génère ce que l'on appelle communément le nuage pollinique qui constitue la concentration moyenne en pollen au-dessus d'une région donnée. Dans ce nuage, les quantités sont bien mélangées et la concentration devient de plus en plus homogène. Harrington (1963) a montré que la dispersion verticale se concentre surtout dans les premiers mètres de la CLA (entre 0.25 et 3 m). Raynor *et al.* (1973) ont aussi montré que  $s_z$  était concentré suivant le même ordre de grandeur que celui de la source, soit entre 0 et 10 m. Raynor *et al.* (1972) précisent que le fait de trouver du pollen à 100 m d'altitude peut servir d'indication quant à la présence d'une source locale. Par ailleurs Raynor et ses collaborateurs (1972, 1974) montrent que lorsque toute source d'ambrosie est absente d'un lieu, son patron de dispersion y est très différent. Les mesures faites sur l'île de Montréal par Comtois en 1994, dans le cas du recours Nadon, vont dans le même sens que les résultats de Raynor *et al.* (1972). Les concentrations sont maximales en bordure de source, puis leur décroissance est de type exponentielle inverse. Le dépôt est fonction de la distance à la source. En bordure de source, les concentrations sont 100 fois supérieures à celles mesurées

sur le toit à Outremont (station de mesure de référence du laboratoire Elzéar Campagna de l'Université de Montréal, représentative d'une surface de 250 km<sup>2</sup> (Gagnon, 1988)). Après 500 m sous le vent de la source, les concentrations sont d'ailleurs toujours du double de celles rencontrées à 50 m au vent de la source (mêmes résultats que Harrington, 1963). Seules les concentrations mesurées en amont de la source sont du même ordre de grandeur que celles provenant de l'extérieur de l'île. Il semble ainsi que les sources locales d'ambrosie en milieu urbain ont une influence toujours détectable à plus de 500 m sous le vent de la source. Cette influence est plus importante que celle de la pluie pollinique mesurée sur le site témoin de toit d'Outremont et plus grande encore, que le flux pollinique pouvant venir de l'extérieur de l'île. Ce n'est qu'en amont des sources que l'on retrouve des concentrations du même ordre de grandeur.

Dans le but de reconstituer cette trajectoire aérobiologique dans le modèle, les trois principales étapes que sont l'émission, la dispersion et le dépôt sont paramétrées dans le MRCC-Pollen. La Dynamique englobe tout ce qui est relatif au transport horizontal tel que l'advection du pollen englobée dans le flux moyen alors que la Physique regroupe ce qui touche aux sources donc à l'émission et aux puits relatifs au dépôt. D'un point de vue purement informatique, la concentration de pollen est considérée de la même façon que les autres variables pronostiques que sont, la température de l'air, l'humidité et le vent. Les programmes relatifs à ces opérations sont explicités et décrits dans la section A3.1-3 de l'Annexe 3.2. Les grains de pollen d'ambrosie sont considérés comme étant sphériques et d'un diamètre de 24 µm. Leur densité est faible, 0.63 (Harrington *et al.*, 1963). La masse du grain est de  $7.2 \cdot 10^{-9}$  kg et sa vitesse terminale de sédimentation est 1.56 cm/s (Gregory, 1973). Un maximum d'environ 3 000 grains pendant de pic d'émission et par plant, est sensé être présent dans l'environnement immédiat des sources (Blanchet 1999, *communication privée*).

À l'origine de ces processus, il y a la carte des sources de pollen. De ces sources, un certain flux de pollen (Eq.5 – Annexe 3.2) émis dans l'air est estimé en suivant une fonction qui tient compte de la densité des plants par unité de surface (N/m<sup>2</sup>), de la masse ( $m_0$ ) d'un grain de pollen et de l'émission (E(t)) d'un plant en nombre de grains par unité de temps. L'émission est en fait une représentation paramétrique des sources émettrices de pollen.

Une fois émis dans le modèle, le pollen est soit, pris en charge par l'atmosphère, soit se dépose immédiatement à proximité de la source ou suivant les conditions plus loin de la source d'émission. La dynamique des particules aéroportées impose un certain nombre de contraintes concernant le transport sur longue distance. De grandes particules telles que les grains de pollen tombent généralement en grand nombre à proximité de la source

d'émission. Elles sédimentent alors sous l'effet de la gravité. Cependant, une petite quantité de ce pollen émis peut tout de même être injectée plus en altitude sous l'effet de la turbulence et des mouvements verticaux de l'air. Ces pollens ont alors de plus grandes chances de voyager sur de plus grandes distances. Les termes de l'eq.2 – Annexe 3.2 sont de prime importance dans les expériences

menées ici. Le premier terme ( $P_{p,h}$ ) correspond à la diffusion horizontale prescrite dans le MRCC et le

second ( $P_{p,v}$ ) est relatif à la diffusion verticale du pollen. Ce second terme est particulièrement déterminant. Il correspond aux processus de sous échelle qui doivent être paramétrés afin d'être pris en compte pour résoudre le mouvement vertical du pollen dans l'atmosphère. Ces processus de dispersion engendrent le nuage pollinique que l'on peut caractériser comme étant la concentration de fond en pollen au-dessus d'une région particulière. Le transport de ce nuage est alors directement influencé par les conditions du vent, tant dans l'horizontal que dans la verticale. Ces mouvements déterminent à quelle hauteur et à quelle distance de la source, on peut retrouver du pollen. On parle de transport lorsque l'on compare les concentrations (grains/m<sup>3</sup> d'air) en un point donné à deux ou plusieurs pas de temps successifs (eq.1).

$$T_{\text{pollen}} = \Delta TR_{(t_2 - t_1)} \quad \text{eq.1}$$

où,  $T_{\text{pollen}}$  est la quantité de pollen transportée au dessus d'un point donné de l'espace entre deux instants  $t_1$  et  $t_2$ . De la sorte, nous obtenons la tendance de la concentration en pollen mesurée en nombre de grains/m<sup>3</sup> d'air/unité de temps.

L'avenir de ces quantités de pollen est ensuite fonction des conditions aérodynamiques de l'air, du pollen et du temps de résidence du pollen dans l'air. Ce temps de résidence est modulé par ce que l'on appelle la déposition sèche ( $P_{ds}$ ) et la déposition humide ( $P_{dh}$ ) que l'on trouve à l'Eq. 4 (Annexe 3.2).

Le paramétrage de la déposition est assez simple dans le modèle. Il se base sur une vitesse de déplacement vers le bas qui est prescrite en tenant compte des dimensions du pollen et de sa masse. La déposition humide peut également être invoquée mais nous ne l'avons pas fait de manière à ne pas alourdir les simulations. Les puits de pollen sont représentés, quant à eux, par les processus de déposition qui sont fonction d'un certain nombre de facteurs tels que le type de pollen, sa masse et ses dimensions, ses propriétés aérodynamiques et sa forme, la vitesse du vent, l'éventuelle intervention de précipitations. La déposition représente en réalité, l'ensemble des processus entraînant l'élimination du pollen de l'air.



La description des modules de diffusion verticale qui permettent l'introduction du pollen dans le modèle ainsi que ceux traitant de la déposition sèche favorisant son élimination sont décrits en détail à la section A3.1-3 de l'Annexe 3.2. Nous revenons ici sur certains points importants pour la compréhension de cette étude. La physique du modèle fait appel à différents modules selon ce que l'on veut résoudre. Elle a pour objectif d'ajuster les variables thermodynamiques (température et humidité) par le biais de la diffusion verticale et de l'ajustement convectif. Elle accumule ensuite les tendances résultant de la diffusion verticale et des flux de surface ainsi que de l'ajustement convectif et du rayonnement terrestre et solaire. Enfin, elle résout le bilan d'énergie à la surface ainsi que les équations du cycle hydrologique. On peut ainsi faire ressortir 3 principaux groupes de processus touchant de plus ou moins loin aux pollens. Ils sont, la diffusion, la convection ainsi que la physique des aérosols incluant entre autre la coagulation et les dépositions sèche et humide.

Concernant la diffusion, il est nécessaire de calculer les coefficients de diffusion verticale d'un certain nombre de quantités dont les traceurs. Pour cela il faut auparavant estimer les coefficients de friction à la surface afin de calculer les flux de surface à partir d'une routine développée dans le cadre de NARCM et dans laquelle a été intégré un calcul de flux de surface pour le pollen d'ambrosie. Ce calcul se fait suivant l'eq.5 – Annexe

A3.1-2 dans laquelle le flux de pollen ( $F_p$ ) émis dans l'air est estimé en fonction de la densité (N) des plants par unité de surface ( $/m^2$ ), de la masse ( $m_0$ ) d'un grain de pollen et de l'émission (E(t)) d'un plant en nombre de grains par unité de temps. De ce calcul, sont extraites deux valeurs, l'une SF01 correspondant aux émissions de pollen dans l'île de Montréal (Pollen In) et l'autre SF02, caractérisant celles provenant du reste du domaine (Pollen Out). Cette subdivision selon les deux origines a pour but de permettre d'étudier distinctement la part de pollen insulaire ou régionale sur la quantité de pollen totale, émise dans le domaine étudié. Le flux ainsi obtenu est mesuré en  $\mu g/m^3$  d'air. Cette fonction d'émission a été ajustée de manière à se calquer sur le cycle diurne de l'ambrosie précédemment décrit. Il faut encore, ensuite, calculer les coefficients de la diffusion verticale, puis déterminer le sommet de la couche limite atmosphérique, enfin calculer les tendances et raffiner les flux de surface. En dernier lieu, on détermine les coefficients de diffusion des traceurs dans la verticale ainsi que ceux de la chaleur.

La convection, quant à elle, est déterminante de la stabilité atmosphérique donc de la capacité de mélange des couches de plus ou moins basse altitude et de ce fait, de la distribution et du devenir des pollens aéroportés. Après un certain nombre de calculs permettant de

contrôler la stabilité, on calcule le flux convectif ainsi que le mélange des traceurs en fonction du schéma convectif utilisé. On calcule ensuite le flux d'humidité, puis suit le réchauffement stable ou convectif par condensation de même que les précipitations convectives ou stables. La prochaine étape est de caractériser la condensation au sommet de la couche de mélange en calculant les précipitations et leur distribution dans la couche. La dernière étape est d'assembler température et humidité spécifique afin de caractériser cette couche convective et d'estimer le sommet de la tropopause en se basant sur le gradient de la température.

Finalement, la physique des aérosols englobe l'ensemble des processus qui tendent à éliminer les particules de l'air. Ceux-ci comptent la déposition sèche, la déposition sous l'effet de la gravité ainsi que le lessivage à la fois dans et sous les nuages. Dans le cas présent, étant donné que nous employons une vitesse terminale de sédimentation constante et égale, nous simplifions le processus et ne faisons que calculer la tendance d'élimination entre les couches du modèle. Le taux de déposition obtenu ou flux, est négatif puisque dirigé vers le bas. Si l'on a par exemple une source de pollen qui émet en un point donné au moment où on intègre ce qui se dépose et que le flux émis vers le haut, excède le flux gravitationnel, alors le flux se tourne vers le haut et devient positif au profit de l'émission. Dans le cas du pollen et des spores de moisissures, Chatigny *et al.* (1979) estiment que la meilleure des estimations de la déposition sèche est obtenue en assumant que les particules se déposent selon le taux gravitationnel qui est en fait le produit entre la concentration en particules et la vitesse terminale de sédimentation des dites particules. S'il est émis dans une CLA bien développée alors le « panache » d'émission s'étire dans toutes les directions (x, y et z). Ainsi les concentrations diminuent plus on s'éloigne de la source. Raynor *et al.* (1967, 1970) ont montré que la relation entre source et distance est fonction de la taille de la source et que seulement 10% de ce qui est émis à partir d'une source, se retrouve à 50 m de celle-ci. C'est à Harrington (1965) que reviennent les évidences de cette hypothèse suite à la réalisation d'une expérience tendant à mettre en évidence les relations entre le taux de dépôt des particules et différentes variables météorologiques. Il montre par ailleurs que cette dispersion verticale s'effectue dans les premiers 3 mètres de l'atmosphère. Raynor et ses collaborateurs (1973, 1972) proposent quant à eux des distances du même ordre de grandeur que la source elle-même, soit entre 0 et 10 mètres, de même qu'ils précisent que du pollen mesuré au-delà de 100 m d'altitude peut servir d'indicateur de la présence d'une source locale. Ce qu'il faut

bien comprendre est que la déposition proche de la surface tend à éliminer les pollens de la base du nuage. La concentration de ce nuage se comble alors soit par diffusion horizontale à partir d'une source proche ou encore par diffusion verticale dirigée vers le bas à partir d'un réservoir ce situant plus haut, tel que l'atmosphère elle-même agissant comme tel. La diffusion permet alors le transfert de grains dans la couche limite atmosphérique et là, ils se déposent à leur tour essentiellement sous l'effet de la gravité. C'est pourquoi, à proximité de la surface lorsque l'on estime la vitesse du flux de déposition d'une quantité  $x$  de pollen, on l'approxime avec justesse par la vitesse terminale de sédimentation telle que définie par Stokes (1819-1903). En fait, dans la couche limite atmosphérique, la turbulence permet le déplacement des pollens dans la verticale mais à proximité de la surface c'est essentiellement la gravité qui intervient (Gregory, 1973).

L'ensemble des variables polliniques de base sont listées dans l'Annexe 3.1. Elles font référence aux 3 phases de la trajectoire aérobiologique de l'ambrosie, à savoir l'émission et la déposition, exprimées sous la forme de flux en nombre de / $m^2/s$  et la dispersion, soit la concentration de pollen dans l'air en un point donné pour un instant donné en  $Kg/m^3$  d'air. Tous ces aspects relatifs aux sources et rythmes du pollen dans le modèle sont importants car ils sont déterminants de l'interprétation ultérieure des résultats obtenus. Dans ces simulations pollen, d'autres paramètres sont également prescrits qui sont passés en revue dans la prochaine section.

#### 3.4. Les autres paramétrages expérimentaux

Nous fixons ici les conditions telles que définies pour les expériences dont la description et l'analyse des résultats sont présentées dans les sections 5.1 et suivantes. En effet, avant toute simulation, l'utilisateur fixe certaines conditions suivant le type d'expérience à réaliser et le type de résultats escomptés. Evidemment, il n'est pas question d'influencer ces derniers mais bien de prendre en compte les capacités du modèle notamment en termes de capacité de calcul. Ces paramètres ainsi déterminés touchent à différents aspects du modèle allant de sa structure physique (taille et localisation de la grille, nombre de niveaux), à sa structure temporelle (durée des simulations, fréquence des pas de temps et de l'archivage des données), à ses paramètres spécifiques (ici traitement du pollen, température de l'eau) et bien d'autres encore. La plupart de ces caractéristiques sont intégrées dans un document appelé « Paramètres ».

Parmi les conditions inhérentes au développement de la méthodologie ici employée, il en est d'autres, toutes aussi déterminantes que celles relevant du pollen. Ainsi, la région à l'étude est composée de terre mais aussi de surfaces en eau relativement importantes. Afin de

distinguer ces deux milieux : terre et eau, il a été décidé de choisir d'employer des critères qui tiennent compte de la valeur de l'albédo de longue longueur d'onde (ALLW). En règle générale en effet, l'eau ne réfléchit la lumière que dans la plage de la lumière visible. Dans la mesure où l'eau ne réfléchit quasiment pas dans le proche infrarouge<sup>3</sup>, elle apparaît très différente des autres surfaces. C'est pourquoi les surfaces en eau seront clairement délimitées en tant que « zones sombres » (faibles valeurs d'albédo) sur les images enregistrées dans le proche infrarouge. Cette méthode permet donc de spécifier une valeur pour ce paramètre en deçà de laquelle, nous considérons les surfaces comme étant majoritairement composées d'eau et au-delà, comme étant composées de terre. Dans le cas présent la valeur de 16% a été retenue. Cela signifie qu'en deçà de cette valeur la surface est de l'eau. Ce type d'approche peut manquer quelque peu de précision mais est acceptable dans l'état actuel des choses. La figure 3.5 présente une image de la superposition du masque terre/eau tel que prescrit dans la physique du modèle et de la topographie telle que vue par le modèle (paramètre Zs) pour pallier au manque de masque terre/eau existant à très fine résolution.



Figure 3.5 : Superposition de la topographie et du masque terre/eau tels que présents sur la grille du MRCC-Pollen

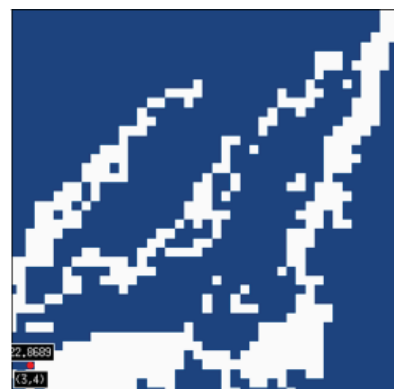
Toujours relatif à l'eau, le cycle thermique diurne de ces surfaces en eau n'est pas considéré. La température de l'eau est prescrite. Peu importe où l'on se trouve et à quel moment de la journée ou de la nuit, elle est invariable et sa valeur a été fixée à 293.16K soit 20°C. Concernant la topographie, le point culminant du Mont Royal est vu par le modèle à 147 m alors qu'il culmine dans la réalité autour des 240 m.

### 3.5. Données disponibles utilisées

Les données disponibles que nous allons traiter sont celles provenant des simulations à 1 Km. A cette échelle de résolution, nous disposons de données polliniques et de données météorologiques entre 1994 et 2003 pour les périodes allant du 10 août au 16 septembre, sauvegardées toutes les 15 minutes. A cette période, nous enlèverons les 4 premiers jours en raison du « spin up ». La liste de ces variables est présentée dans l'Annexe 3.4. Précisons qu'en ce qui concerne les variables météorologiques, nous distinguons les variables mesurées à la surface comme si elles étaient issues de l'observation, sous abri pour température et humidité et à la hauteur de l'anémomètre pour le vent. Ces données sont alors parfaitement comparables aux données d'observation provenant de l'aéroport et présentées dans le chapitre 2. Concernant les variables polliniques de base, listées dans l'Annexe 3.4, elles concernent les 3 phases de la trajectoire aérobiologique de l'ambroisie, à savoir l'émission et la déposition qui sont des flux ( $/m^2/s$ ) et la concentration de pollen dans l'air en un point donné pour un instant donné ( $Kg/m^3$  d'air). Nous parlerons de transport lorsque nous comparerons les concentrations en un point donné à deux ou plusieurs pas de temps. Les données de concentrations seront traduites en nombre de grains de pollen /  $m^3$  d'air, de manière à pouvoir les comparer avec les données d'observation.

De manière à pouvoir comparer les données d'observation provenant des 4 sites de mesure, les données simulées sont extraites sur des points de grille du modèle correspondant aux emplacements géographiques de ces 4 stations. Il a été nécessaire vu la relative grossièreté du masque terre/eau employé de nous assurer que ces points se situaient tous hors d'eau. La figure 3.6 localise les 4 sites de mesure tels que situés dans le domaine étudié.

Dans une première étape, nous avons extrait de ces 4 points, les données de pollen de même que les paramètres météorologiques correspondant et nous les analysons au regard des données disponibles de l'observation. Nous pouvons à la fois mettre en évidence si différence il y a, du point de vue météorologique entre les valeurs simulées aux sites de mesure et les données de l'aéroport international Pierre-Elliott-Trudeau puis analyser le comportement des données polliniques simulées comparativement à celles issues de l'observation. Cette première analyse fait l'objet de la section 5.1.



Ouest



Centre ville



Ville Lasalle



Est

Figure 3.6 : Emplacement des 4 stations de mesure d'observation sur la grille du modèle

Cette analyse complétée, nous traiterons dans la section suivante d'un ensemble de situations permettant de mettre en avant les apports de cette nouvelle approche. Il sera question d'analyser ce qu'il se passe à l'occasion de différentes situations météorologiques typiques. Pour cela, nous allons dans un premier temps présenter les situations météorologiques issues des données de réanalyse NCEP-NCAR ayant servi à initialiser le modèle à 49 km. Cette démarche va nous permettre d'associer les situations de types de temps présentées dans le chapitre 2 avec des situations plus parlantes puisque illustrées du point de vue synoptique. Parmi ces situations typiques, nous avons mis en évidence l'existence de types de temps particulièrement polliniques contrairement à d'autres qui le sont moins. Le modèle devrait nous permettre d'affiner la compréhension que nous avons eue jusqu'à présent de ces situations et de leurs implications tant sur les basses couches de l'atmosphère que sur le cycle diurne et la trajectoire aérobiologique du pollen. Il sera aussi question de prêter attention à l'effet des rivières sur le déplacement du pollen en fonction des moments de la journée. Nous serons aussi en mesure d'estimer la contribution de l'île de Montréal pour chaque situation comparativement au pollen qui vient d'ailleurs. Enfin, de manière à rendre ces résultats plus parlants et surtout plus facilement transposables vis-à-vis de ce pour qui ils doivent être finalement utiles, c'est-à-dire les praticiens, les intervenants municipaux ou les patients eux-mêmes, nous tacherons de proposer une cartographie des risques simulés réaliste.

#### 4. Comparaison entre données observées et données simulées

Le but de cette section est d'établir un lien entre données observées et données simulées. Les années 1997 à 2003 ont été sélectionnées à cette occasion, années pendant lesquelles au moins toujours 3 stations d'observation sur 4 ont fonctionné. Pour chacune d'elles, les valeurs des paramètres qui nous intéressent ont été extraites. Ces paramètres sont à la fois polliniques et météorologiques. A des fins de comparaison, les données obtenues par la simulation à plus fine échelle sont comparées graphiquement à celles provenant de l'observation. Afin d'être en mesure de réaliser ces comparaisons, il a été préalablement nécessaire de produire des moyennes par 24 heures à partir des données obtenues toutes les 15 min à 1 km, coïncidant avec les valeurs d'observation. Nous avons donc moyenné les valeurs comprises entre minuit heure avancée de l'Est (HAE) du jour 1 et 23 :45 du même jour et ainsi de suite. Nous disposons ainsi, pour chaque année, entre les 10 août et 14 septembre, de séries de données quotidiennes comparables aux données météorologiques ou polliniques observées.

#### 4.1. Comparaison des conditions atmosphériques

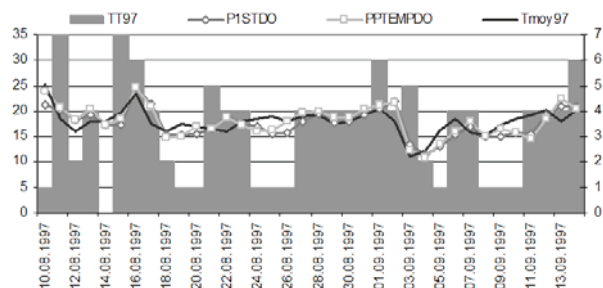
Les données à la surface (niveau de l'anémomètre), notées P1ST pour la température, P1PNM pour la pression, P1VIT et P1DIR pour vitesse et direction du vent, et à 1000 mb, notées PPTEMP, PPVIT, PPDIR et PPHR pour l'humidité relative ainsi que le flux solaire entrant et la nébulosité, ont été extraites des simulations. Ces données ont toutes été simulées et n'ont donc aucun lien direct avec les données d'observation mis à part le fait que la simulation d'initiation a été réalisée à partir des données de réanalyse NCEP-NCAR de la période correspondante. Elles proviennent de 4 points localisés sur la grille du modèle, représentatives des stations d'observation du pollen ainsi que de l'aéroport. On leur a donc attribué le nom de la station correspondante. Elles sont comparées aux données météorologiques provenant de l'aéroport International Pierre Elliott Trudeau dont nous avons obtenu la base de données présentée dans le cadre du chapitre 2. Ces graphiques sont présentés dans les Figures 3.7 à 3.11, classés par paramètre.

Dans un premier temps, le Tableau 3.1 présente les valeurs moyennes de la période 1997-2003 des principaux paramètres comparés avec celles provenant de l'observation. Les valeurs moyennes observées figurent sous l'intitulé OBS à la première ligne du tableau et correspondent aux valeurs moyennes obtenues à l'aéroport international de Montréal. Toutes les autres moyennes sont des valeurs simulées aux points du modèle correspondant à la localisation de l'aéroport (DORVAL) et des stations de mesure du pollen. Il est facile de remarquer qu'entre stations simulées, il existe pour chaque paramètre peu de différences. Elles sont en effet quasi nulles avec la pression, la station de l'Est est en moyenne plus fraîche que les autres si l'on regarde la température de surface mais ce n'est plus le cas à 1000 mb, les stations Ouest et Est sont les plus humides, suivies de Dorval et du CV qui sont médianes et VL qui est la moins humide. Concernant la vitesse du vent, peu de différences apparaissent également. Les stations Ouest et Est sont en moyenne légèrement plus venteuses à proximité de la surface comme à 1000 mb et présentent des directions moyennes du vent avec une composante Ouest un petit peu plus marquée qu'au centre ville et à VL.

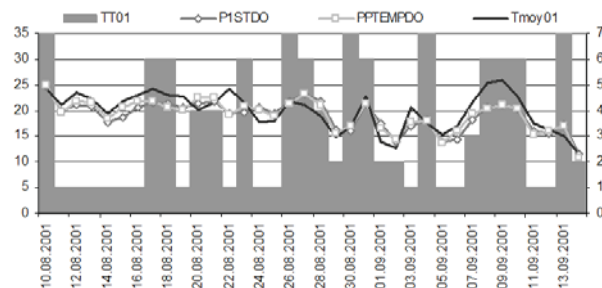
MOY24	P1USL	P1PNM	TmoyP1ST	TmoyPPST	HRmaxPPRH	HRminPPRH	HRmoyPPRH	U(T)/P(VL)	U(T)/P(VL)	DIR1/P1DR	DIR1/PPDR
OBS	1016.3	19.6	19.6	89.5	50.6	70.1	3.7	3.7	182.6	182.6	
DORVAL	1016.7	19.0	19.2	84.1	84.1	84.1	2.8	5.8	227.4	226.8	
OUEST	1016.7	19.0	19.2	84.7	84.7	84.7	2.8	5.8	221.7	219.8	
VL	1016.7	19.1	19.2	83.6	83.6	83.6	2.7	5.8	217.7	226.3	
CV	1016.8	19.0	19.1	84.0	84.0	84.0	2.7	5.8	219.9	228.1	
EST	1016.8	18.3	19.0	84.5	84.5	84.5	2.8	5.9	228.1	230.5	

Tableau 3.1 : Moyennes 1997-2003 des principaux paramètres observés et simulés par le modèle selon les stations de mesure simulées

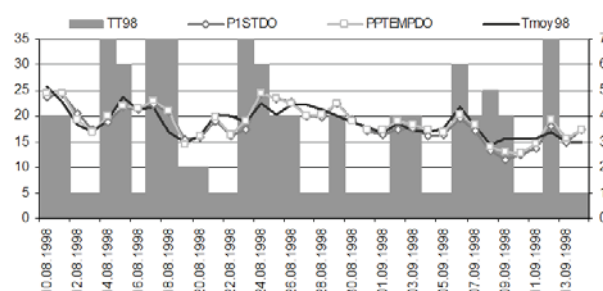




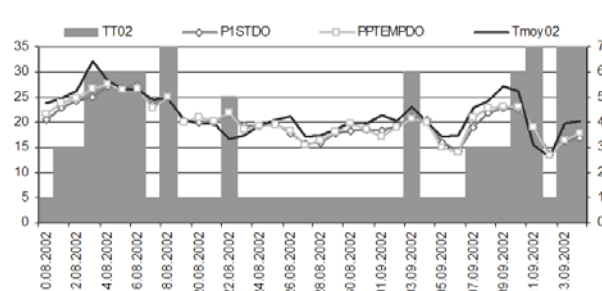
1997 - Température de l'air



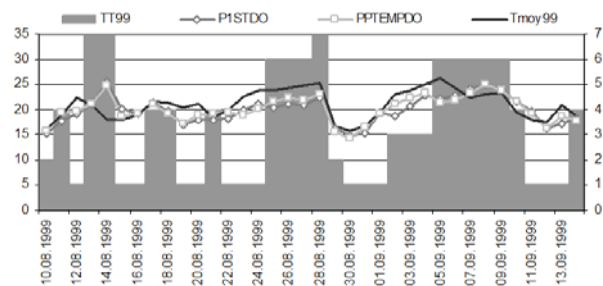
2001 - Température de l'air



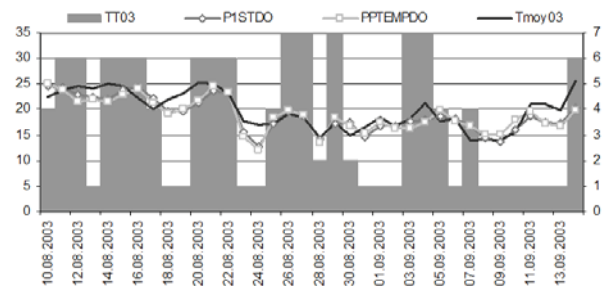
1998 - Température de l'air



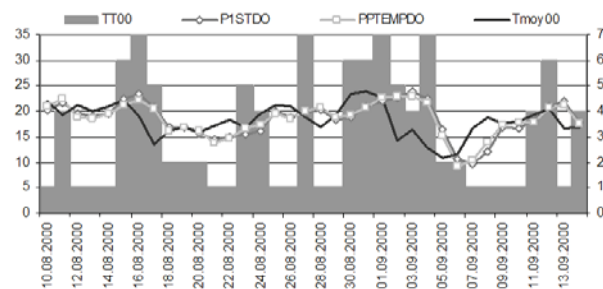
2002 - Température de l'air



1999 - Température de l'air



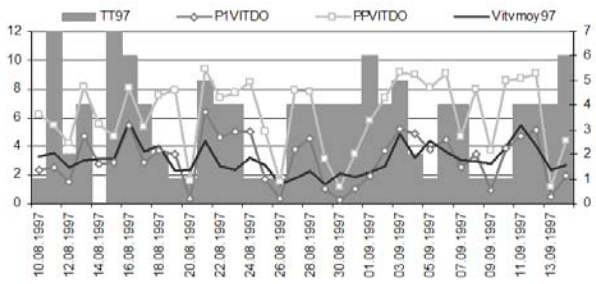
2003 - Température de l'air



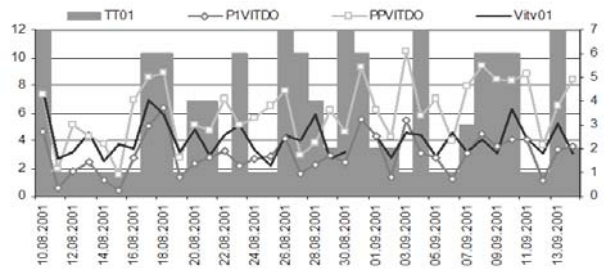
2000 - Température de l'air

Figure 3.7 : Evolution temporelle de la température de l'air observée en °C (trait noir) et simulée au point correspondant à l'aéroport entre 1997 et 2003. Les zones grisées représentent les types de temps notés de 1 à 7

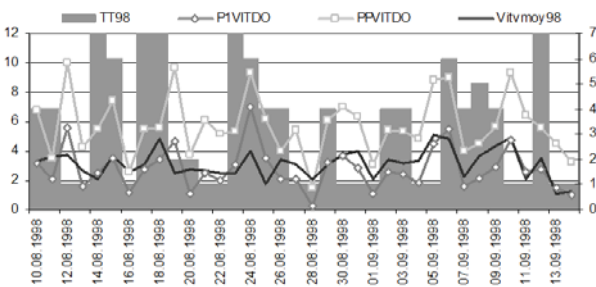




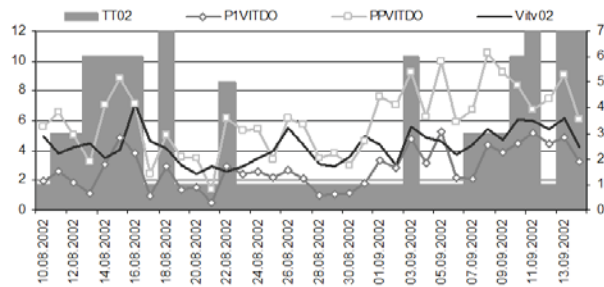
1997 - Vitesse du vent



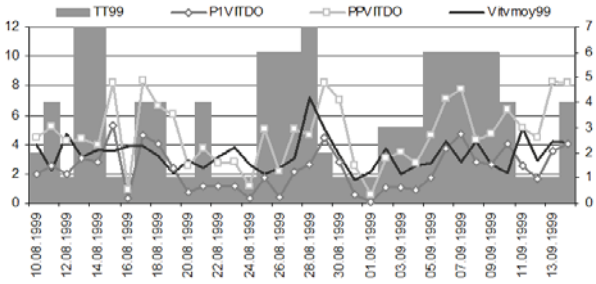
2001 - Vitesse du vent



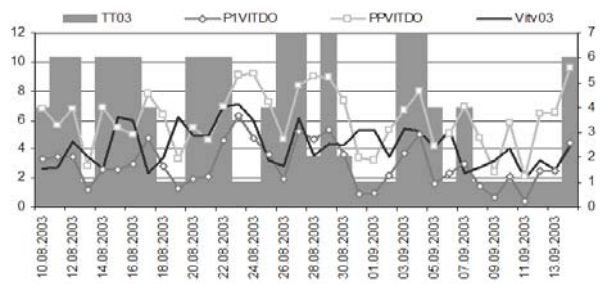
1998 - Vitesse du vent



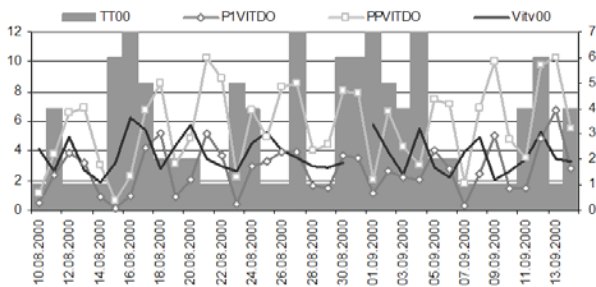
2002 - Vitesse du vent



1999 - Vitesse du vent

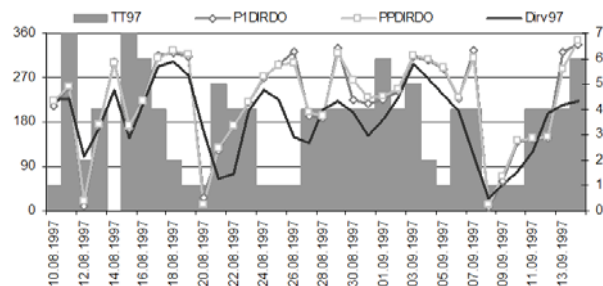


2003 - Vitesse du vent

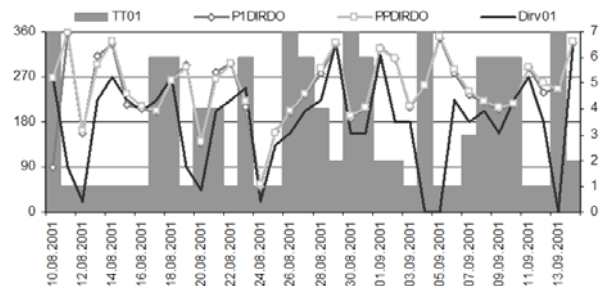


2000 - Vitesse du vent

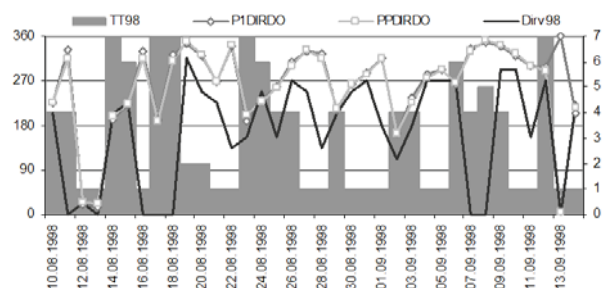
Figure 3.8 : Evolution temporelle de la vitesse du vent observée en  $m.s^{-1}$  (trait noir) et simulée au point correspondant à l'aéroport entre 1997 et 200. Les zones grisées représentent les types de temps notés de 1 à 7



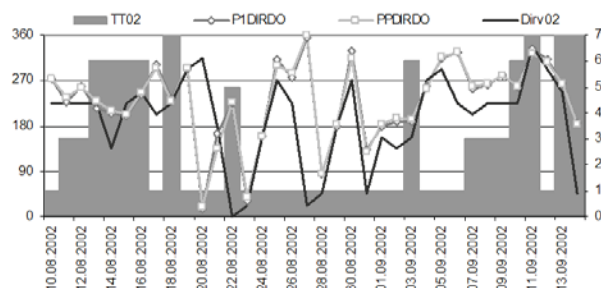
1997 - Direction du vent



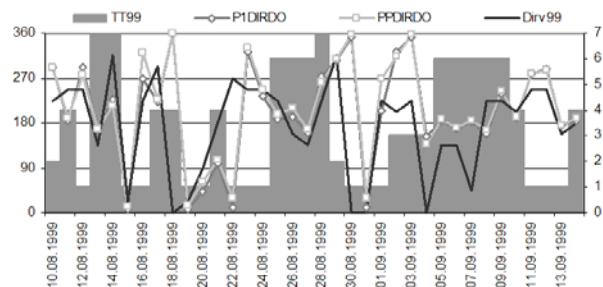
2001 - Direction du vent



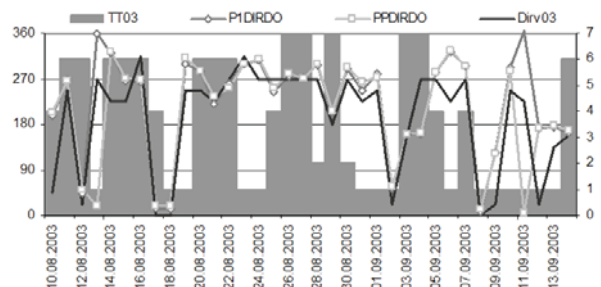
1998 - Direction du vent



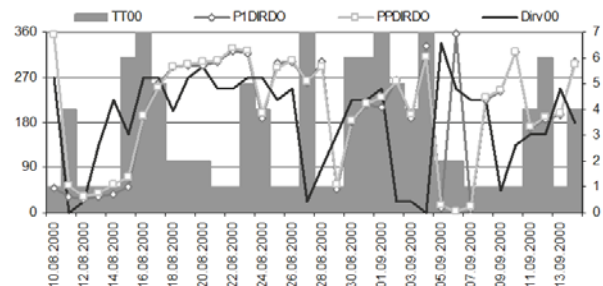
2002 - Direction du vent



1999 - Direction du vent

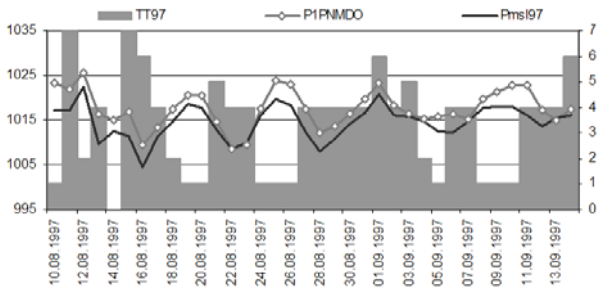


2003 - Direction du vent

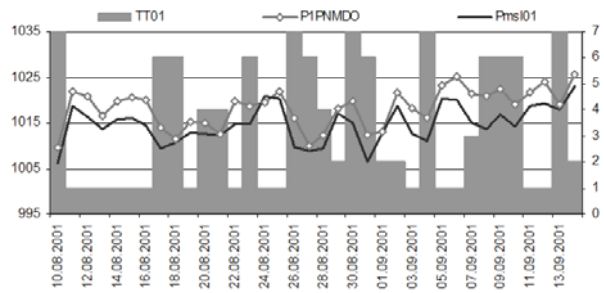


2000 - Direction du vent

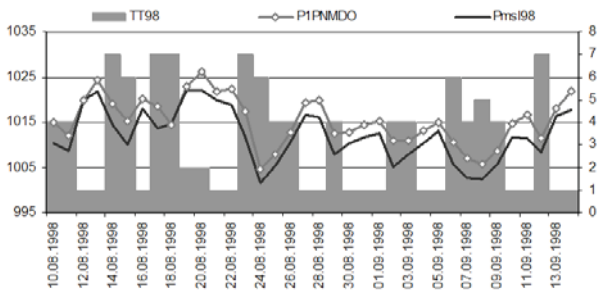
Figure 3.9 : Evolution temporelle de la direction du vent observée en degrés (trait noir) et simulée au point correspondant à l'aéroport entre 1997 et 2003. Les zones grisées représentent les types de temps notés de 1 à 7



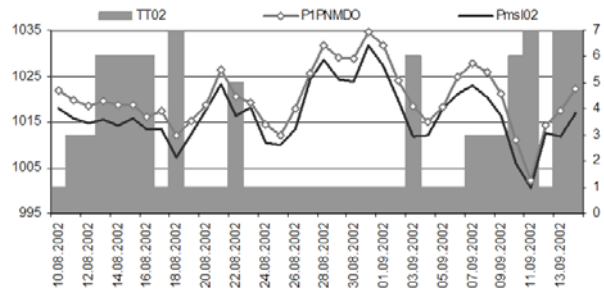
1997 - Pression atmosphérique



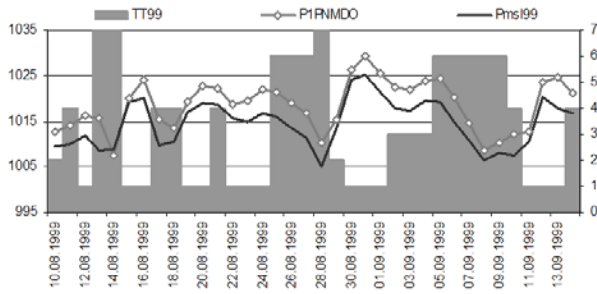
2001 - Pression atmosphérique



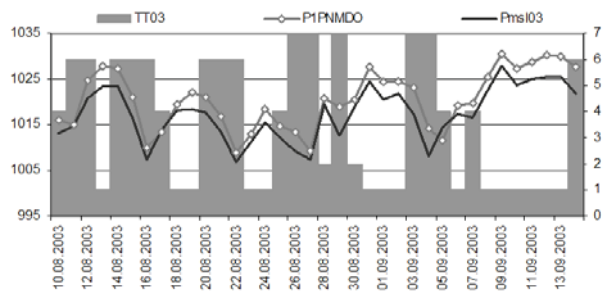
1998 - Pression atmosphérique



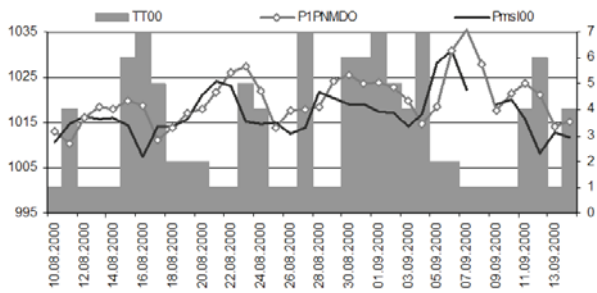
2002 - Pression atmosphérique



1999 - Pression atmosphérique

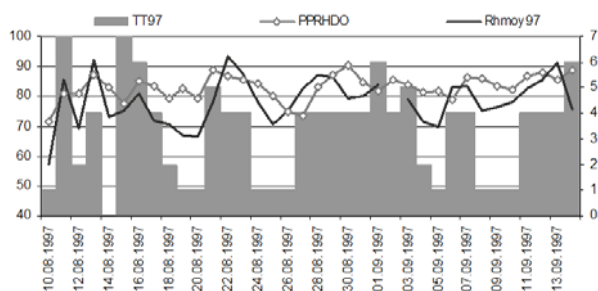


2003 - Pression atmosphérique

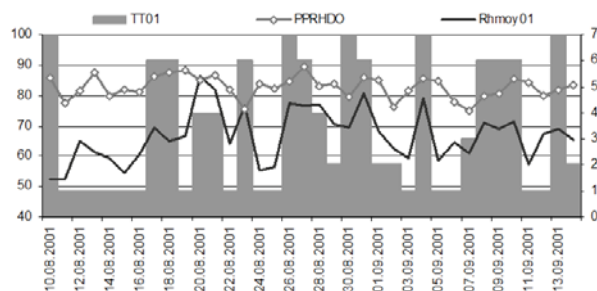


2000 - Pression atmosphérique

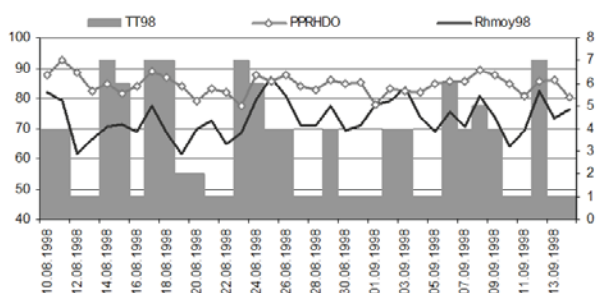
Figure 3.10 : Evolution temporelle de la pression atmosphérique observée en hPa (trait noir) et simulée au point correspondant à l'aéroport entre 1997 et 2003. Les zones grisées représentent les types de temps notés de 1 à 7



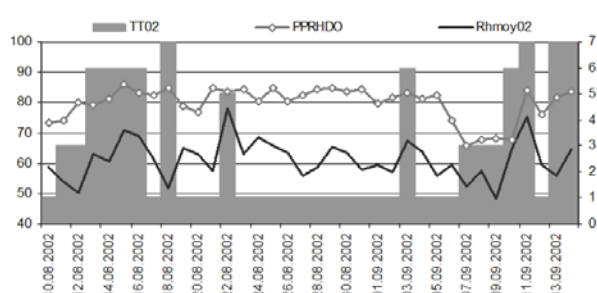
1997 - Humidité relative



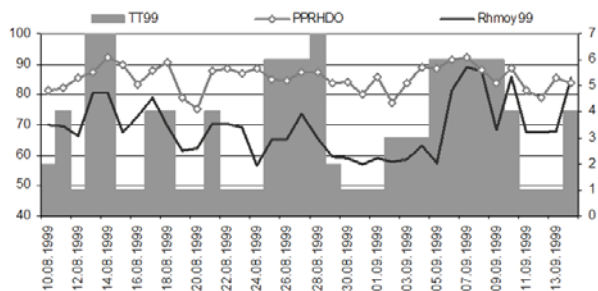
2001 - Humidité relative



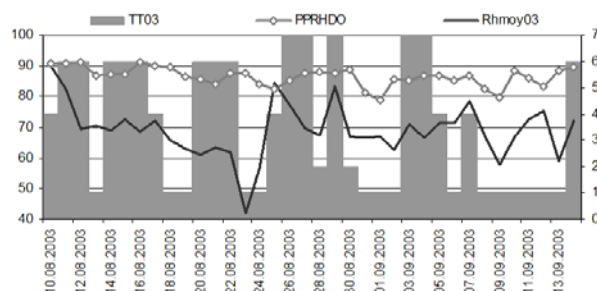
1998 - Humidité relative



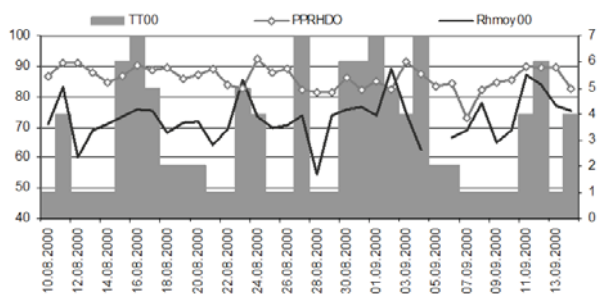
2002 - Humidité relative



1999 - Humidité relative



2003 - Humidité relative



2000 - Humidité relative

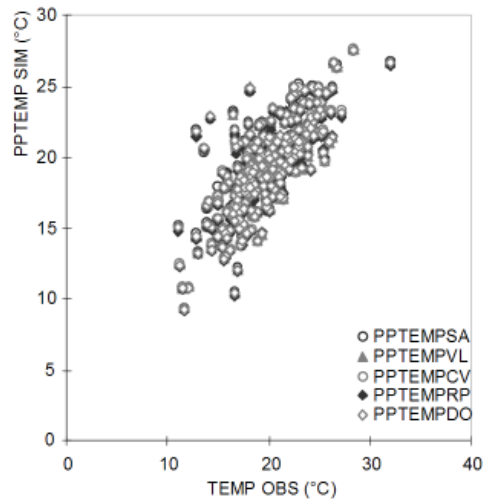
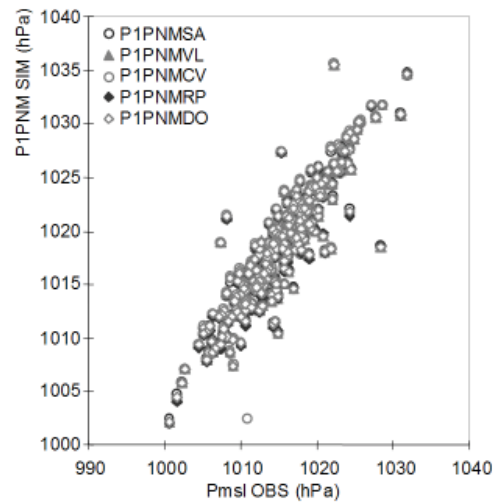
Figure 3.11 : Evolution temporelle de l'humidité relative observée en % (trait noir) et simulée au point correspondant à l'aéroport entre 1997 et 2003. Les zones grisées représentent les types de temps notés de 1 à 7

La Figure 3.12 confirme de fortes corrélations entre les données issues de l'ensemble des stations et celles provenant de l'observation pour certains paramètres tels que notamment la pression atmosphérique ( $r_s$  varie entre 0.890 et 0.895 selon les stations pour  $\alpha = 0.05$ ) ou la température de l'air ( $r_s$  varie entre 0.616 et 0.756 selon les stations pour  $\alpha = 0.05$ ) et d'autres, plus faibles, avec notamment la vitesse ( $r_s$  varie entre 0.365 et 0.422), la direction du vent ( $r_s$  varie entre 0.320 et 0.422) ou l'humidité relative ( $r_s$  varie entre 0.249 et 0.356). Dans le cas de la température, c'est la température minimum qui présente les corrélations les plus fortes.

De façon globale, signalons que le modèle simule des conditions plus humides que celles qui sont observées et que par ailleurs, la vitesse du vent y est également un peu plus forte à 1000 mb (et plus faible à la surface). Concernant la direction du vent même si la dispersion est relativement grande remarquons cependant un nuage de point principal situé dans le quart SO-NO tant pour la simulation que pour l'observation.

Les graphiques des Figures 3.7 à 3.11 offrent une vision de l'évolution dans le temps des paramètres observés comparativement à ceux simulés par le modèle au point « Dorval ». Apparaissent sur ces graphiques également les types de temps par année, dont le numéro est lisible sur les axes de droite des graphiques. Nous remarquons en ce qui concerne la température une très bonne co-variation des températures simulées et de celle issue de l'observation chaque année. Il existe quelques décalages un peu plus marqués en 2000 mais rien de bien significatif. Remarquons par ailleurs que l'année 1999 est la plus chaude, dans le modèle également, suivie de 2002, 2001 et 2003. 2002 présente notamment une période particulièrement chaude entre le 11 et le 16/08 de même qu'à nouveau entre le 07 et 10/09, ce que le modèle reproduit parfaitement bien. Les années 1997 et 1998 sont plus semblables entre elles, un peu moins chaudes en moyennes également. Concernant la vitesse du vent, les écarts entre simulation et observation sont plus grands mais il existe encore ici une relativement bonne co-variation. La vitesse observée est médiane entre la vitesse à la surface et celle à 1000 mb mais s'apparente peut être plus en terme de variation à la vitesse à la surface. La direction du vent est également un paramètre assez satisfaisant en termes de co-variation. Certains écarts existent occasionnellement mais ils ne sont pas si nombreux. Enfin la pression atmosphérique observée est légèrement moins élevée que celle qui est simulée mais leur comportement est très similaire. Finalement en ce qui concerne l'humidité relative, c'est avec ce paramètre que les écarts sont les plus forts. A part en 1997, année durant laquelle les valeurs sont du même ordre de grandeur, le reste du temps, l'humidité simulée est beaucoup plus forte. Dans l'ensemble la variation se fait dans le même sens avec ici encore quelques écarts.

Ils permettent encore de signaler que les températures les plus élevées sont généralement associées à des types de temps, tropical humide, tropical sec ou de transition. Le type polaire sec semble être le type de temps qui tire le plus fortement les températures vers le bas. Durant les périodes fréquentes de type tempéré sec, la température est moyenne et relativement stable. Concernant la vitesse du vent notons des pointes, des accélérations essentiellement à l'occasion du type de transition mais aussi plus occasionnellement lors des types polaire et tropical humide. Il est plus difficile d'assortir un type de temps particulier à une direction spéciale du vent. La variabilité est plus grande mais il est toutefois possible d'insister sur le fait de la plus grande fréquence des vents du Sud et de l'Ouest au cours de la période analysée. Enfin, dernier paramètre intéressant, la pression nous indique que chaque type de temps tropical humide initie une baisse notable de celle-ci encore plus marquée lors de situations de transitions et qu'inversement les types de temps secs, tempéré, polaire voire même tropical sont associés aux plus fortes valeurs de pression.





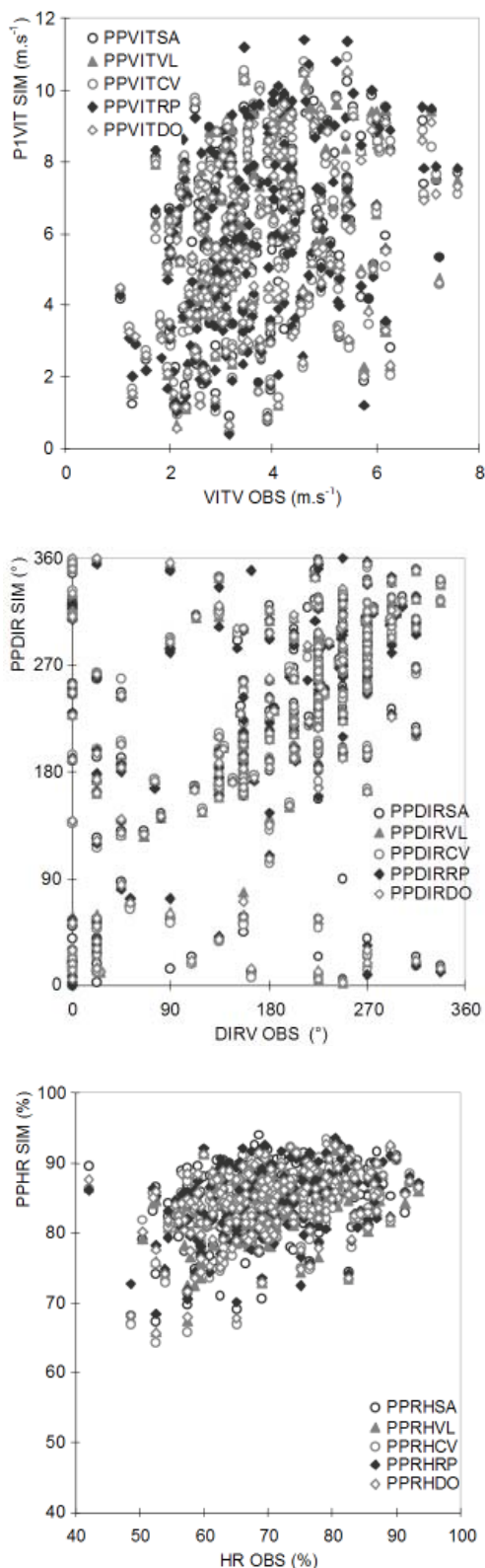


Figure 3.12 : Représentation graphique des corrélations (toutes significatives pour  $\alpha = 0.05$ ) entre les données d'observation et celles simulées de chaque station

La comparaison de ces données météorologiques nous conforte tant dans la qualité des données d'observation dont nous disposons que dans celles générées par le modèle. Nous sommes ainsi assurés de la bonne

reproduction des situations d'année en année par le modèle.

#### 4.2. Comparaison des conditions polliniques

Il semble ainsi que le modèle reproduise les conditions atmosphériques avec un bon degré de fiabilité, dès lors nous en déduisons que si les paramètres polliniques introduits dans le modèle sont corrects alors la simulation de la trajectoire aérobiologique devrait être également fiable ou tout au moins l'impact des conditions atmosphériques devrait se faire de manière proche de ce qui se produit dans la nature. Nous portons dès à présent notre attention sur le comportement du pollen dispersé dans l'air. Afin de pouvoir comparer ces données avec les données d'observation, il a été nécessaire de transformer ces séries de données obtenues toutes les 15 minutes sous la forme de valeurs moyennes journalières. Les résultats obtenus figurent au Tableau 3.2 en ce qui concerne les moyennes quotidiennes annuelles et au Tableau 3.3, pour ce qui est des totaux. Les données de pollen qui nous intéressent dans ce contexte sont évidemment celles associées au flux de pollen dans l'air, noté TR03, c'est-à-dire la quantité globale de pollen mesurée dans l'air, sommation du pollen intérieur de l'île (TR01) et du pollen extérieur (TR02). Nous aborderons ultérieurement la question de l'émission et de la déposition. Figurent également à l'Annexe 3.5 les courbes polliniques simulées annuelles.

La consultation du Tableau 3.2 permet de noter que les valeurs moyennes simulées sont de beaucoup inférieures aux valeurs mesurées dans la réalité. D'année en année et de site en site, les fluctuations des quantités simulées sont bien moindres également que celles observées. On relève même une forte régularité dans le temps et entre les stations. Ceci n'est que peu étonnant étant donnée la manière dont on a paramétré le pollen dans le modèle. Chaque jour voit la même quantité de pollen émise dans le domaine. Les quantités échantillonnées d'un point de mesure à un autre, peuvent varier suivant que ce point se situe plus ou moins sur le parcours du nuage, en moyenne, les quantités que voient chacun des points ne doivent pas être foncièrement différentes. Il peut en être autrement des quantités totales tel qu'il est possible de le voir dans le Tableau 3.3.

MOYENNE	OBSERVATION					SIMULATION				
	QUEST	VL	CV	EST	MOY SPATIALE	QUEST	VL	CV	EST	MOY SPATIALE
1997	110.6	41.6	75.0	111.9	83.9	11.9	12.4	11.2	12.6	12.0
1998	164.9	76.2	86.8	110.3	109.8	12.9	13.3	13.3	14.3	13.5
1999	249.2	68.7	95.1	107.2	129.2	11.3	12.1	12.3	12.6	12.1
2000	259.9	60.4	81.0	103.1	126.1	11.7	12.0	11.1	11.7	11.6
2001	211.3	91.3	90.8	100.9	124.8	11.2	11.7	11.5	13.1	11.9
2002	106.0	130.4	30.1	36.4	75.0	10.8	11.1	11.5	11.9	11.3
2003	177.2		55.9	61.1	99.3	10.9	11.3	11.5	11.3	11.2
GLOBALE	182.7	78.1	73.5	90.2	106.9	11.5	12.0	11.8	12.5	12.0

Tableau 3.2 : Moyennes comparées des concentrations de pollen d'ambrosie (grains/m<sup>3</sup> d'air) simulées et observées par site de mesure et par année ainsi qu'en moyenne spatiale globale

Dans le modèle, les sites globalement les plus polliniques sont par ordre décroissant la station Est, puis VL, le CV et enfin l'Ouest. A première vue, cela paraît surprenant étant donné que nous avons localisé ces points en considérant les coordonnées spatiales exactes des sites d'observation. Mais il ne faut pas non plus oublier que le pollen n'est émis dans le modèle que dans le domaine de plus fine résolution spatiale, ce qui peut avoir des implications directes sur les comptes mesurés puisque alors, seul le pollen local est enregistré. Cela signifie que les flux d'air potentiellement chargés en pollen d'origine plus lointaine (extra frontaliers) ne sont pas perçus dans le modèle.

TOTAL	OBSERVATION					SIMULATION				
	OUEST	VL	CV	EST	MOY SPATIALE	OUEST	VL	CV	EST	MOY SPATIALE
1997	2987.1	1497.7	2698.7	4027.8	3020.0	429.8	445.4	403.5	453.1	433.0
1998	5806.0	2744.8	2865.0	3427.0	3953.8	463.2	486.7	485.8	514.2	487.5
1999	8972.1	2471.9	3421.9	3643.9	4651.1	407.5	435.5	441.4	453.6	434.5
2000	9355.8	2173.7	2917.5	3710.7	4539.4	422.0	430.5	398.1	420.7	417.8
2001	7606.7	3103.2	3268.8	3632.5	4493.4	403.7	420.9	414.1	470.6	427.3
2002	3817.8	4564.4	1084.5	1310.7	2699.4	388.1	401.0	413.1	429.8	408.0
2003	5846.4	1856.4	2079.0		3576.0	391.6	405.1	413.2	405.3	403.4
GLOBAL	44191.9	16555.6	18212.8	21831.7	26933.1	2905.9	3025.2	2969.3	3147.3	3011.5

Tableau 3.3 : Totaux comparés des concentrations de pollen d'ambrosie (grains/m<sup>3</sup> d'air) simulées et observées par site de mesure et par année ainsi qu'en moyenne spatiale globale

Quoiqu'il en soit, si l'on compare les moyennes spatiales globales entre elles dans le cas des moyennes journalières, il existe environ un facteur 10 entre la simulation et l'observation. Dans le cas du total ce facteur est plutôt de 7. Par ailleurs, si l'on compare les totaux globaux obtenus station par station, alors entre la simulation et l'observation, il existe un facteur 15 à l'Ouest, 5.5 à VL, et 6 au CV et dans l'Est.

Nous avons ensuite cherché à savoir si les échantillons issus des points simulés se comportaient de manière différente les uns des autres. Pour vérifier ceci nous avons réalisé un test de Kruskal-Wallis pour k échantillons indépendants (Tableau A2-3.3), puisque nous avons comparé les 4 sites de mesure les uns par rapport aux autres, durant la période 1997-2003. Il en est ressorti que la différence entre les échantillons était significative pour  $\alpha = 0.05$ . Le test de comparaison multiple appliqué a permis de mettre en évidence que l'Ouest et l'Est ont un comportement plus ou moins semblable et significativement différent de celui de VL et du CV qui se comportent également de manière équivalente. Ce qu'il nous intéresse de montrer ici est qu'en dépit du fait que les quantités de pollen ne varient pas de jour en jour, les fluctuations connues entre les sites pour des périodes semblables sont significativement différentes, laissant présumer que les conditions météorologiques ont un effet différentiel entre les sites, de jour en jour. Nous avons ainsi la confirmation que ce que le modèle simule en terme de quantité n'est certes pas directement comparable en l'état actuel des choses avec l'observation mais qu'en revanche, l'effet des conditions atmosphériques est tout à fait perceptible, identifiable voire estimable.

Enfin, un test de Friedman pour k échantillons dépendants a été appliqué sur tous les échantillons annuels issus d'un même point de mesure afin de voir si, d'une part, une ou des années se démarquaient des autres et d'autre part, si un ou des sites voyaient leur comportement pollinique simulé complètement varier d'une année à l'autre. Les résultats sont mixtes. Le site de l'Ouest, ne présente aucune différence significative pour  $\alpha = 0.05$  au même titre que celui de VL mais il semble cependant que l'année 2002 soit quelque peu différente de 1997 et 1998, dans les deux cas. Les résultats au CV soulignent une tendance de différence entre les années ( $\alpha = 0.1$ ) et cette fois-ci c'est l'année 1998 qui se différencie de toutes les autres à part de 2001. Enfin, c'est dans l'Est, que la différence inter annuelle est la plus notable ( $\alpha = 0.05$ ) et dans ce cas, c'est l'année 1998 qui se distingue de toutes les autres, à part de 1999. L'année 1998 est celle présentant à cette station les comptes et la moyenne saisonnière les plus élevés ( $TR03_{moy} = 14.6 / m^3 / 24 h$  contre environ 11.2 les autres années avec un total de 514 grains). La Figure 3.16 en fournit l'illustration. Nous remarquons que l'année 1998 est marquée à l'Est par un fort pic simulé de pollen durant la période allant du 22 au 25 août. La consultation des données météo laisse apparaître une température moyenne relativement stable mais en revanche un pic de vent important associé à un passage d'un front chaud marqué par une chute drastique de la pression, une des valeurs les plus basses de la période étudiée et des vents tournant brutalement du NW au Sud puis plus au SW. Durant cet épisode, l'humidité relative est en forte augmentation également. Cette description nous amène à penser que si le modèle n'est pas en mesure de simuler les pics polliniques associés aux remontées de flux du Sud chargés en pollen lointain dans l'Ouest de l'île voire à Ville Lasalle, il est toutefois en mesure d'identifier ces événements plus dans l'Est de l'île, voire occasionnellement même au CV du fait de leur localisation dans le domaine. Evidemment, les quantités de pollen demeurent moindres qu'elles ne l'ont probablement été dans la réalité mais le pic est détectable.

Afin d'évaluer la qualité de la co-variation entre concentrations simulées et concentrations observées, nous proposons à la Figure 3.13, une série de graphiques annuels qui représentent la moyenne spatiale globale observée, sur laquelle on superpose la moyenne spatiale globale simulée et multipliée par le facteur 10. Evidemment, il apparaît bien clairement qu'il n'y a pas, avec les données simulées, un début et une fin de saison. Le fait que chaque jour, le pollen soit émis en proportions semblables, efface ces apparences relatives au cycle saisonnier. Il apparaît également selon les années une relativement bonne cohésion entre les fluctuations des simulations et celles des observations. Certes les pics majeurs ne sont pas apparents dans les simulations lorsqu'ils sont probablement le fruit de masses d'air chargées en pollen lointain. En revanche, s'ils sont le

résultat de situations plutôt locales, alors ils apparaissent (ex. 29/08/97, 25/08/98, 24/08 et 01/09/99 ou encore 19/08/01). Remarquons aussi que l'année la moins bien représentée par la simulation en terme d'allure de la courbe est probablement l'année 2000, année pendant laquelle il y a eu répétition de situations de type de temps tropical humide, de transition et polaire. Cette année-là, le plus gros des comptes polliniques a dû arriver de l'extérieur. Dans de telles situations, le modèle sous estime les quantités.

Les Figures 3.14 à 3.17 présentent les courbes polliniques simulées et observées annuelles et par station, mises en relation avec les types de temps et complètent celles de l'Annexe 3.5. Sur ces graphiques nous pouvons identifier le fait que les concentrations polliniques simulées les plus élevées ne sont pas nécessairement associées aux mêmes types de temps que les valeurs observées ou tout au moins de façon aussi marquée. Par ailleurs, comme nous l'avons déjà signalé, les valeurs les plus élevées ne sont pas attribuées aux mêmes sites que dans la réalité. Nous remarquons en revanche que les types de temps 6 et 7 sont associés à des pics d'ampleur certes moindre mais identifiables tout de même et plus particulièrement en des points tels que la station Est. Ces pics ne sont absolument pas détectés à la station Ouest à part celui du 11/09/2002 perçu en tous les sites. La chute de la pression associée à cet événement est particulièrement importante (Figure 3.10). Il est intéressant de voir que ce pic est également détecté dans la réalité par toutes les stations, mais plus encore à la station Ouest avec toutefois un jour d'avance.

Afin de compléter cette section de comparaison entre données du modèle et données observées, nous nous concentrons sur la distribution entre la part de pollen venant de l'extérieur de l'île (TR02) sur celle provenant de l'intérieur (TR01). Les Figures 3.18 à 3.21 présentent les graphiques s'y référant pour chaque station et par année. Il faut savoir que dans tous les cas de stations analysés, tout le pollen émis est de provenance locale donc insulaire. Le flux de pollen émis total est composé à 100% de pollen local. La consultation des graphiques montre d'office que le pollen circule et qu'une bonne part des pollens enregistrés à chaque station provient à chaque fois de sources extra locales, entendons du domaine mais hors de l'île. Il y a donc un brassage effectif des pollens dans le modèle. Par ailleurs les graphiques de la colonne de droite donnent de la même façon la part de pollen déposée à proximité du site en fonction de son origine.

Site par site, nous pouvons dire que dans l'Ouest majoritairement, le pollen enregistré est extra local. Ceci est vrai plus spécifiquement lors de journées de type de temps tropical humide, de transition mais aussi tempéré humide. En revanche, la part de pollen local est plus abondante à l'occasion du type tempéré

sec, tropical sec, voire même polaire sec. En terme de proportions, les pollens venant de l'extérieur demeurent dominants cependant à part à quelques exceptions près. Ces exceptions sont les 26/08/97(TT1) 06/06/97 (TT1) et 13/09/97 (TT4), 20/08/99 (TT1), 10/08/00 (TT1), 14-15/08/99 (TT1 puis TT6), 29/08/99 (TT1), 20-21/08/02 (TT1) et 11/09/02 (TT7) et 02/09/03 (TT1). Concernant la déposition on peut remarquer que normalement il s'agit du même masque graphique, à la seule différence près que la part de pollen déposée d'origine locale est plus importante.

En ce qui concerne la station VL, il peut arriver que la part de pollen local sur la concentration totale mesurée soit tout à fait nulle comme c'est le cas par exemple durant la période du 10 au 12/09/97 ou encore du 31/07 au 03/09/02 et d'autres encore. Dans tous ces cas, le type de temps en présence est soit tropical humide, soit tempéré humide mais il peut aussi arriver qu'il soit tempéré sec comme dans le cas de l'année 2002. En revanche, et en principe à l'occasion de types de temps secs, la part de pollen local est plus importante bien que pas nécessairement dominante. Il existe quelques situations où elle l'est toutefois (+ de 60% du total), telles le 26/08/97 (TT1), les 7-8/09/98 (TT4), le 23/08/99 (TT1), les 13-15/08/2001 (TT1), le 19/08/2003 (TT1). Concernant le dépôt du pollen, les remarques faites dans le cas de l'Ouest sont également valables ici.

Au CV, on retrouve un peu la même configuration de graphiques dans le cas de VL, c'est-à-dire avec des journées durant lesquelles le pollen extérieur est dominant et d'autres, durant lesquelles la part de pollen extérieur est moindre. Il peut en revanche arriver ici que la part de pollen local atteigne les 80% du total des concentrations mesurées, ce que nous n'avions pas encore vu. C'est le cas du 24/08/99, du 01/09/99 et du 15/08/01 dans tous les cas de type tempéré sec. Les remarques demeurent les mêmes concernant le dépôt du pollen.

Enfin, à la station Est, il peut arriver, mais beaucoup plus rarement, que le pollen extérieur soit totalement dominant. Les précédentes remarques valables pour les trois autres stations ne sont pas aussi systématiquement valables dans l'Est. En effet, il est possible de remarquer des passages de type de temps tropical humide ou tempéré humide ou de transition durant lesquels la part de pollen intérieur est plus grande que celle de l'extérieur et inversement à l'occasion de types de temps plus secs. Il est fort possible, vu ce que nous avons déjà noté plus tôt que sa position dans le domaine soit ici, directement en cause. Dans tous les cas, la tendance est ici aussi que la part de pollen extérieur demeure la plus grande en principe. Il peut parfois arriver que ces tendances soient inversées en termes de provenance du pollen, du fait que ce site est dans un cas de flux du Sud sous l'effet de l'ensemble du domaine, effet qui ne peut être ressenti

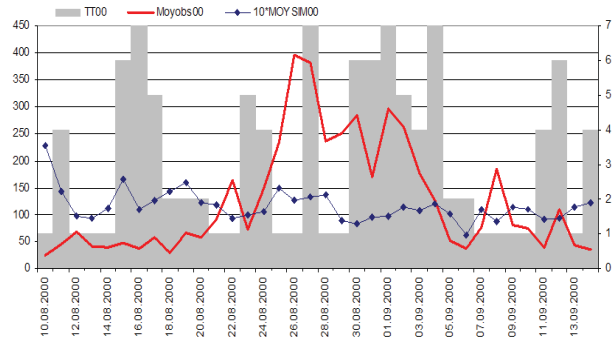
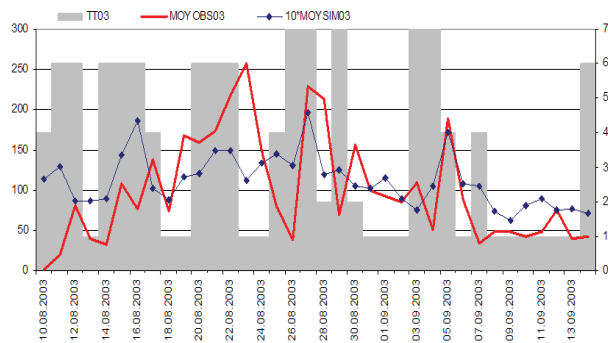
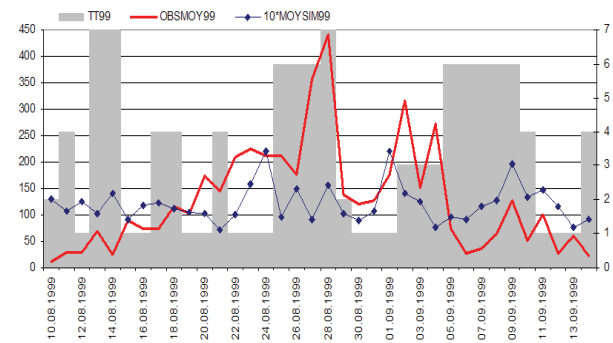
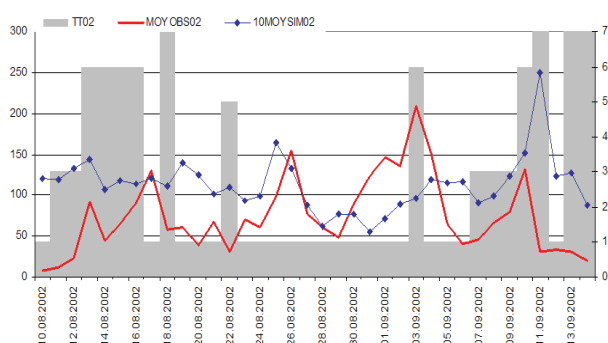
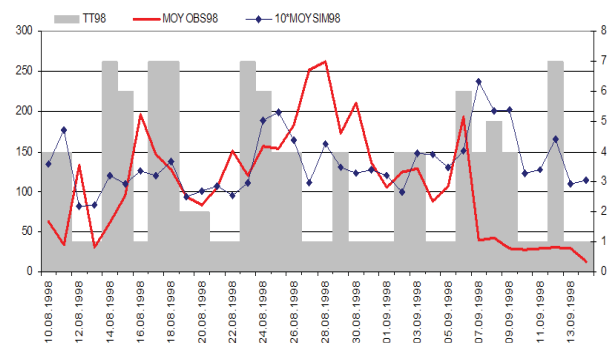
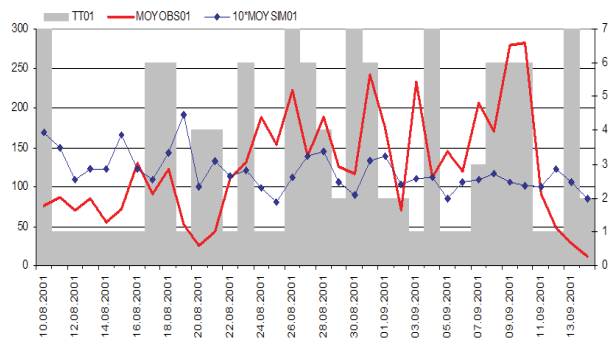
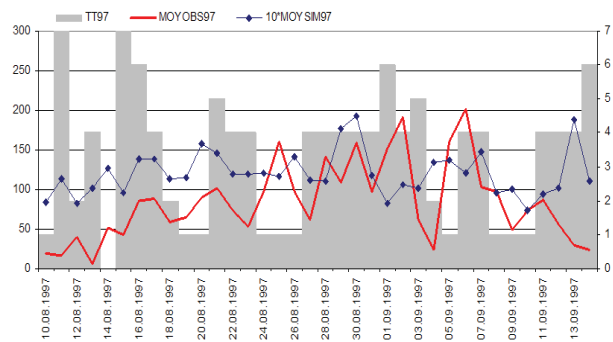


Figure 3.13 : Illustration de la variation des concentrations polliniques simulées et observées sur une base annuelle et en tant de moyenne spatiale globale dans les deux cas. En noire pointillée apparaît la courbe simulée ( $10 * \text{moyenne globale}/24 \text{ heures}$ ) et en noire, la courbe observée. Les types de temps sont numérotés sur l'axe de droite



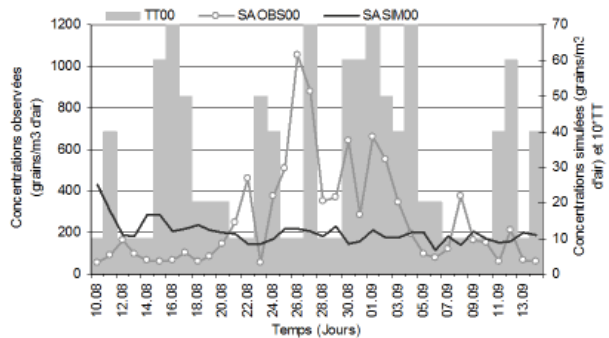
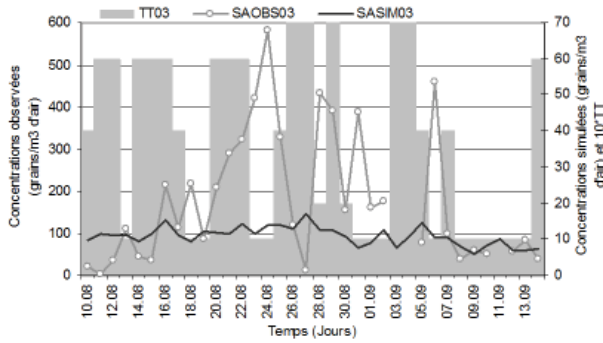
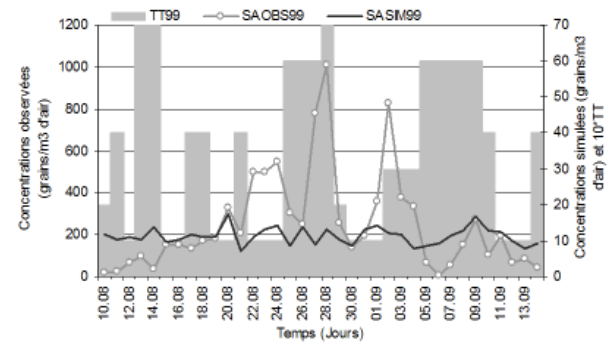
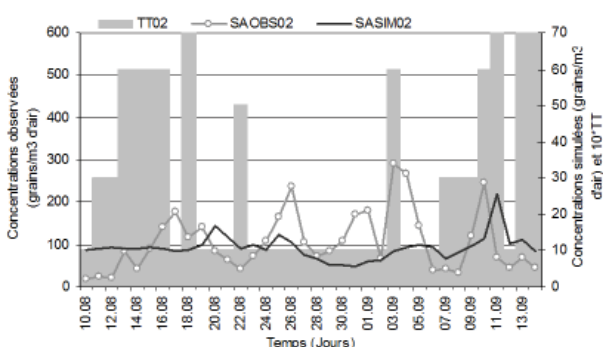
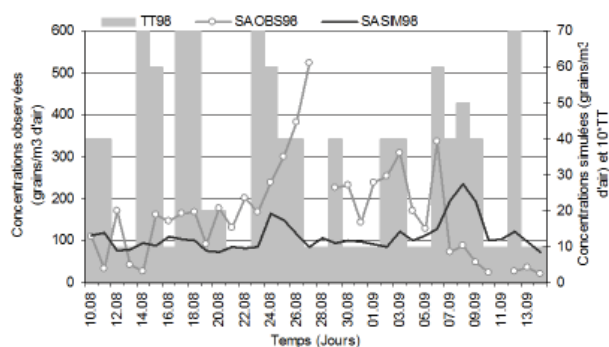
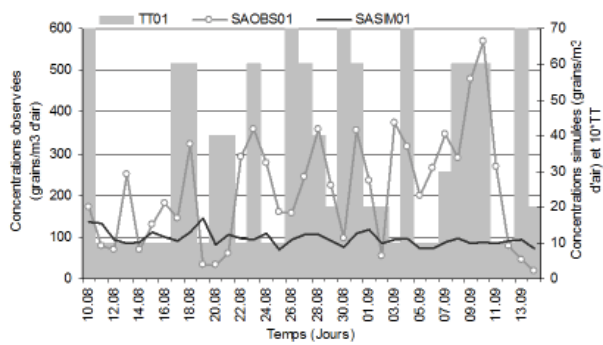
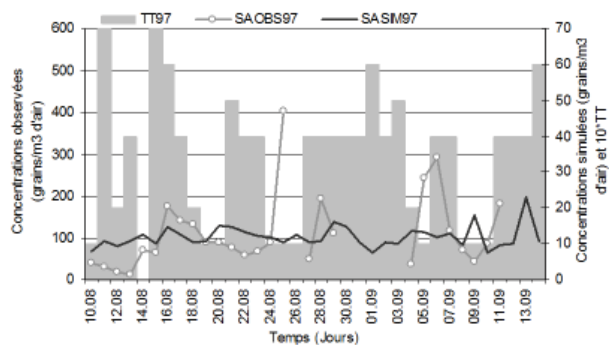


Figure 3.14 : Courbes des concentrations polliniques observées et simulées par année avec superposition des types de temps. Situation dans l'Ouest (SA)



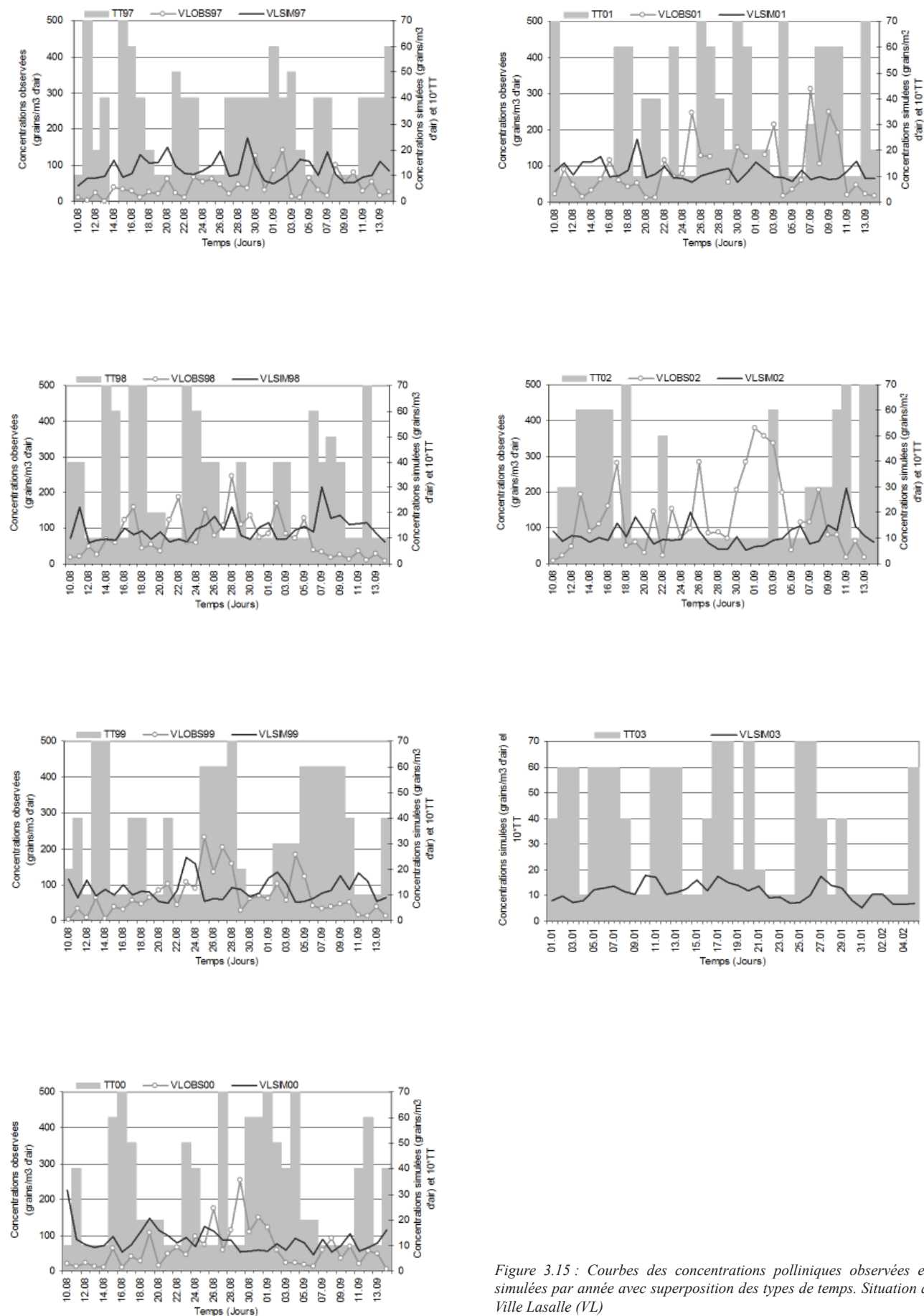


Figure 3.15 : Courbes des concentrations polliniques observées et simulées par année avec superposition des types de temps. Situation à Ville Lasalle (VL)

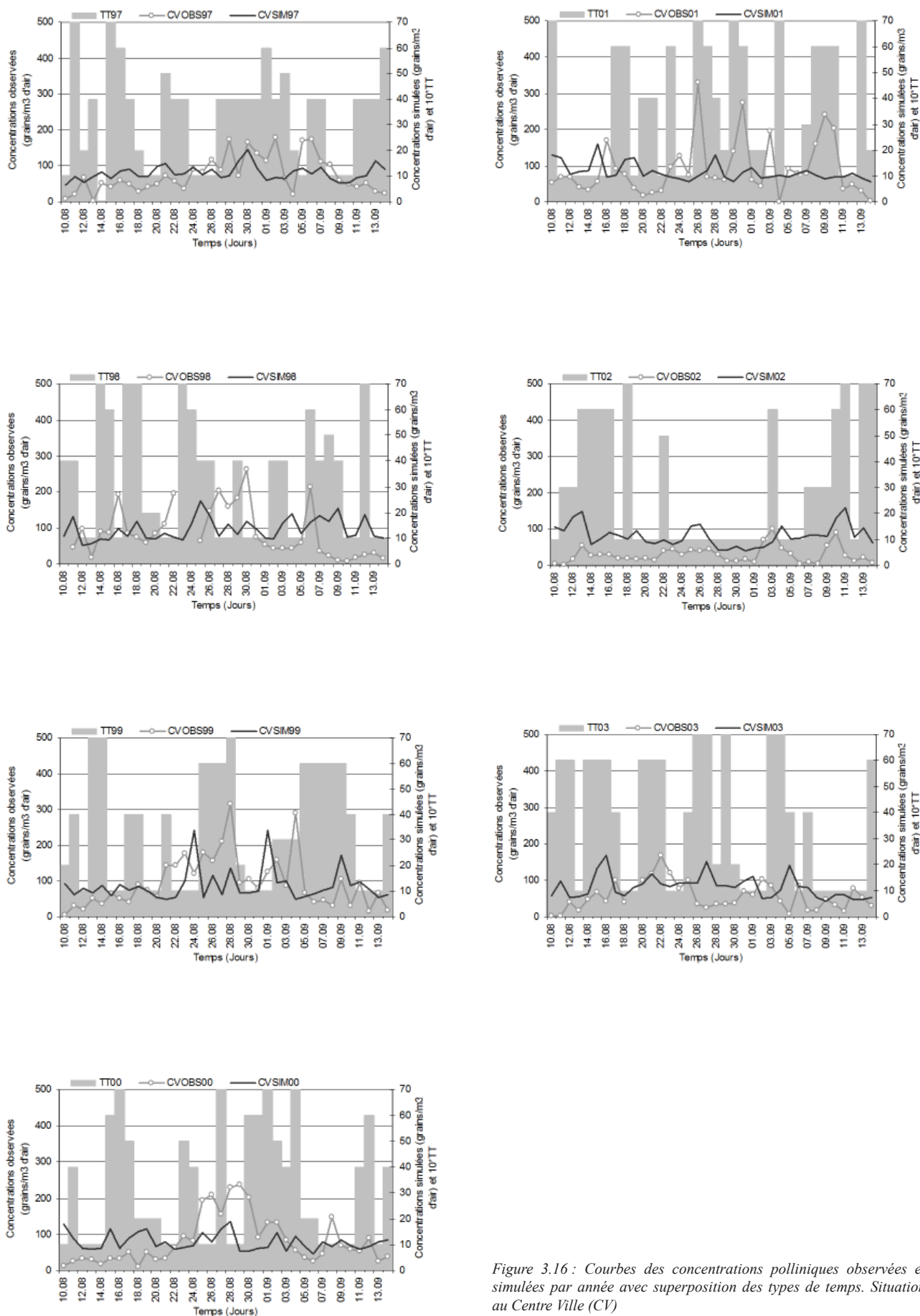


Figure 3.16 : Courbes des concentrations polliniques observées et simulées par année avec superposition des types de temps. Situation au Centre Ville (CV)

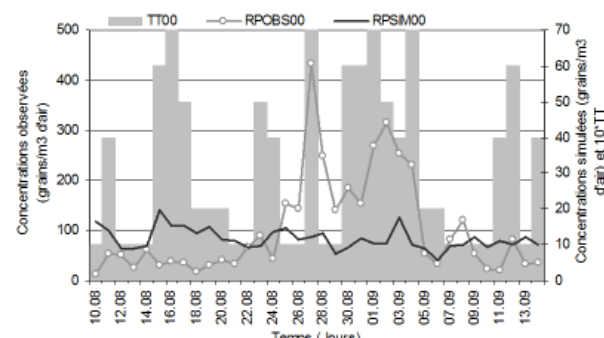
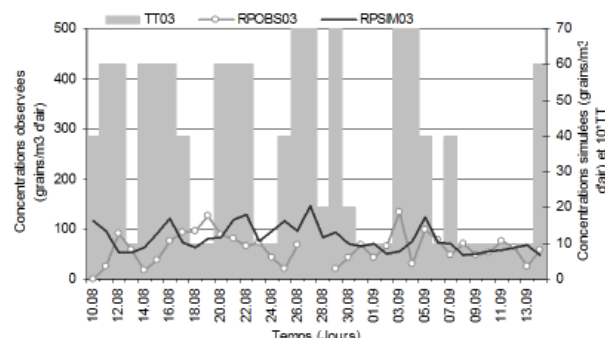
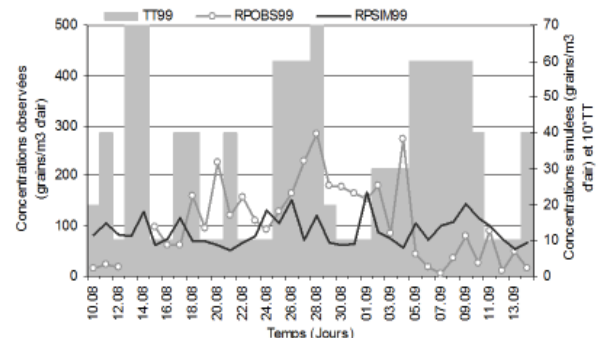
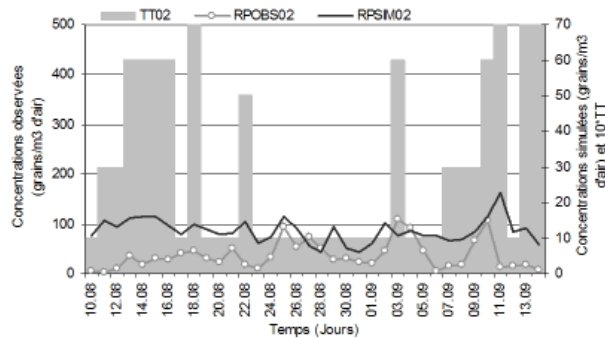
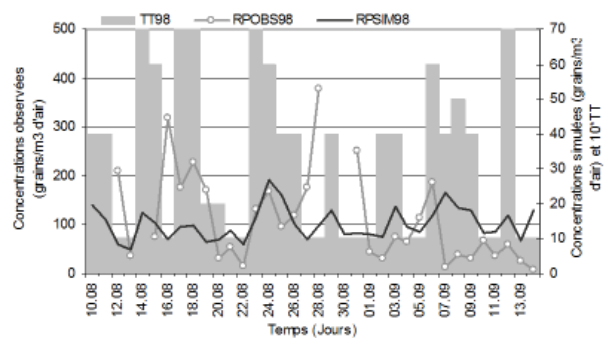
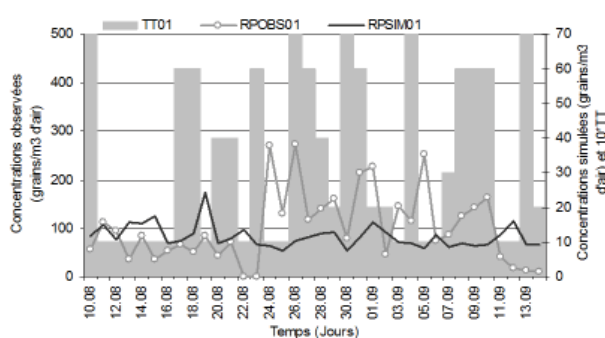
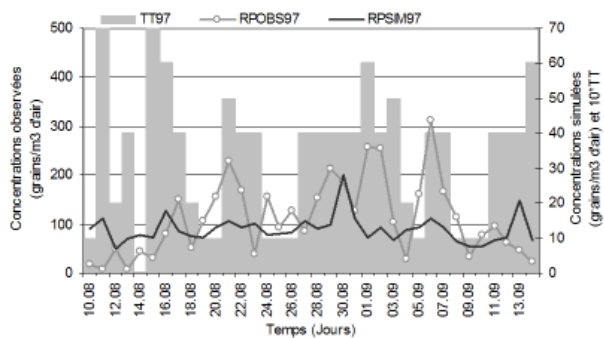
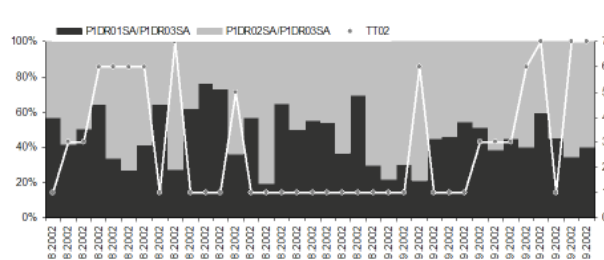
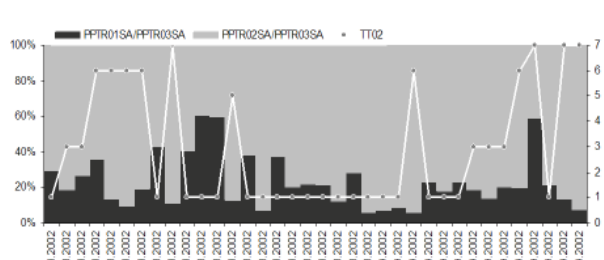
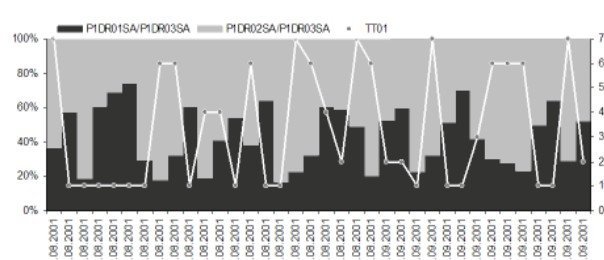
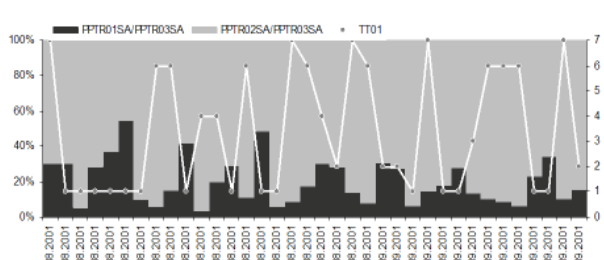
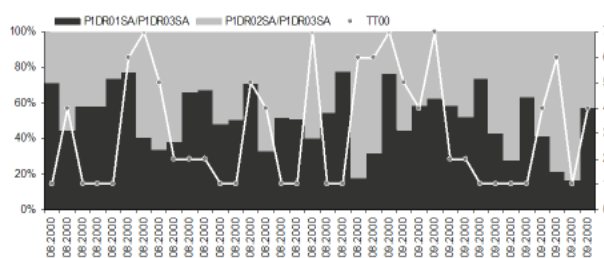
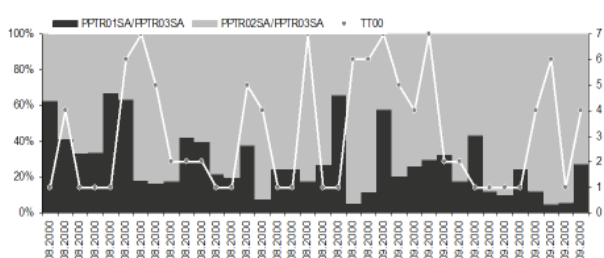
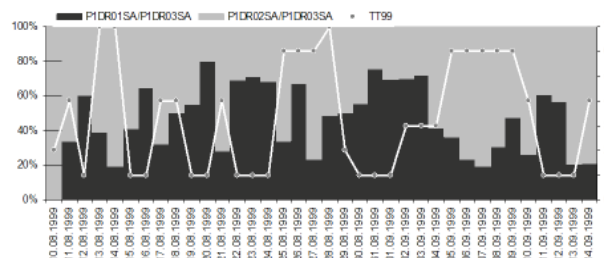
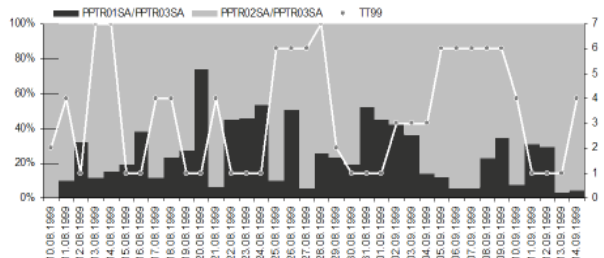
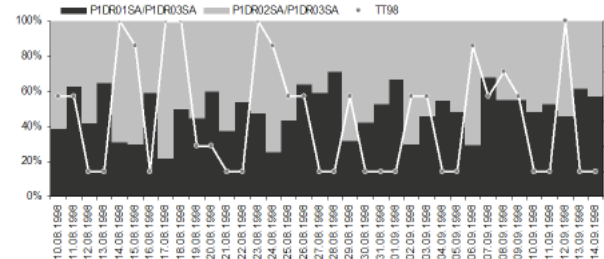
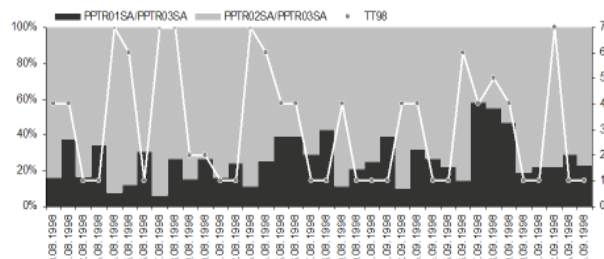
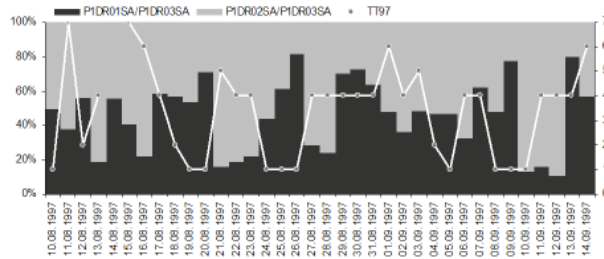
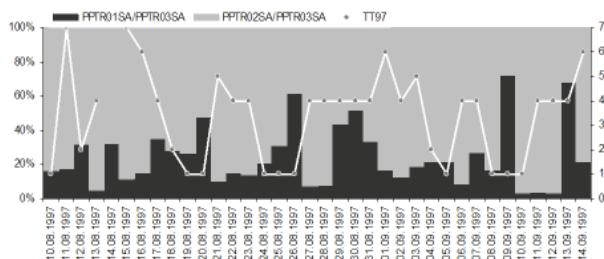


Figure 3.17 : Courbes des concentrations polliniques observées et simulées par année avec superposition des types de temps. Situation dans l'Est (RP)



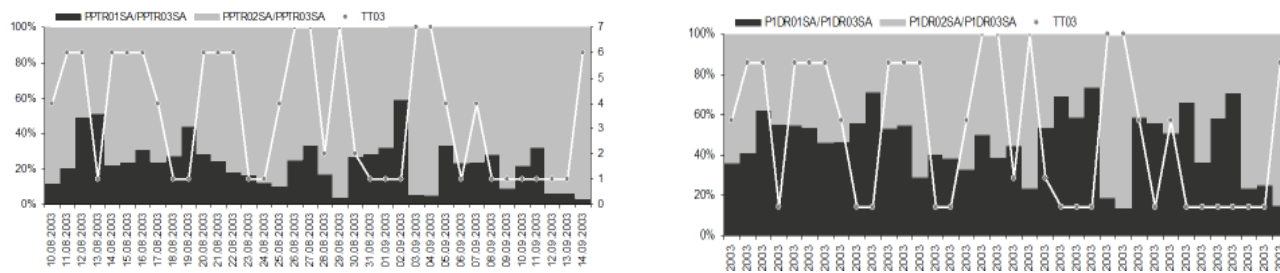
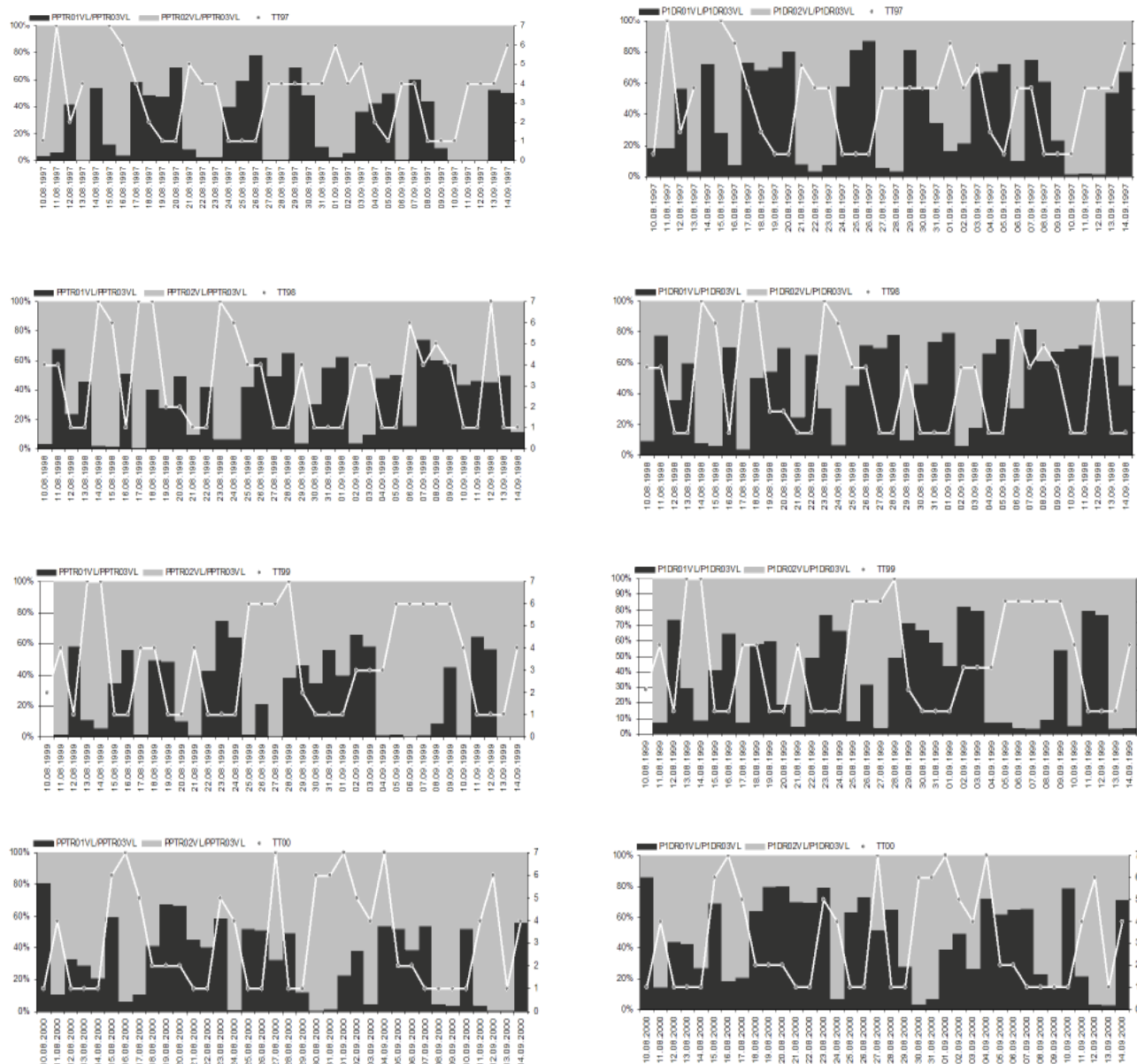


Figure 3.18 : Distribution en % de la part du flux de pollen local et extérieur sur le flux total de pollen simulé (colonne de gauche) et de la part de pollen local ou extérieur déposé sur le dépôt total (colonne de droite) par le modèle par année à la station Ouest





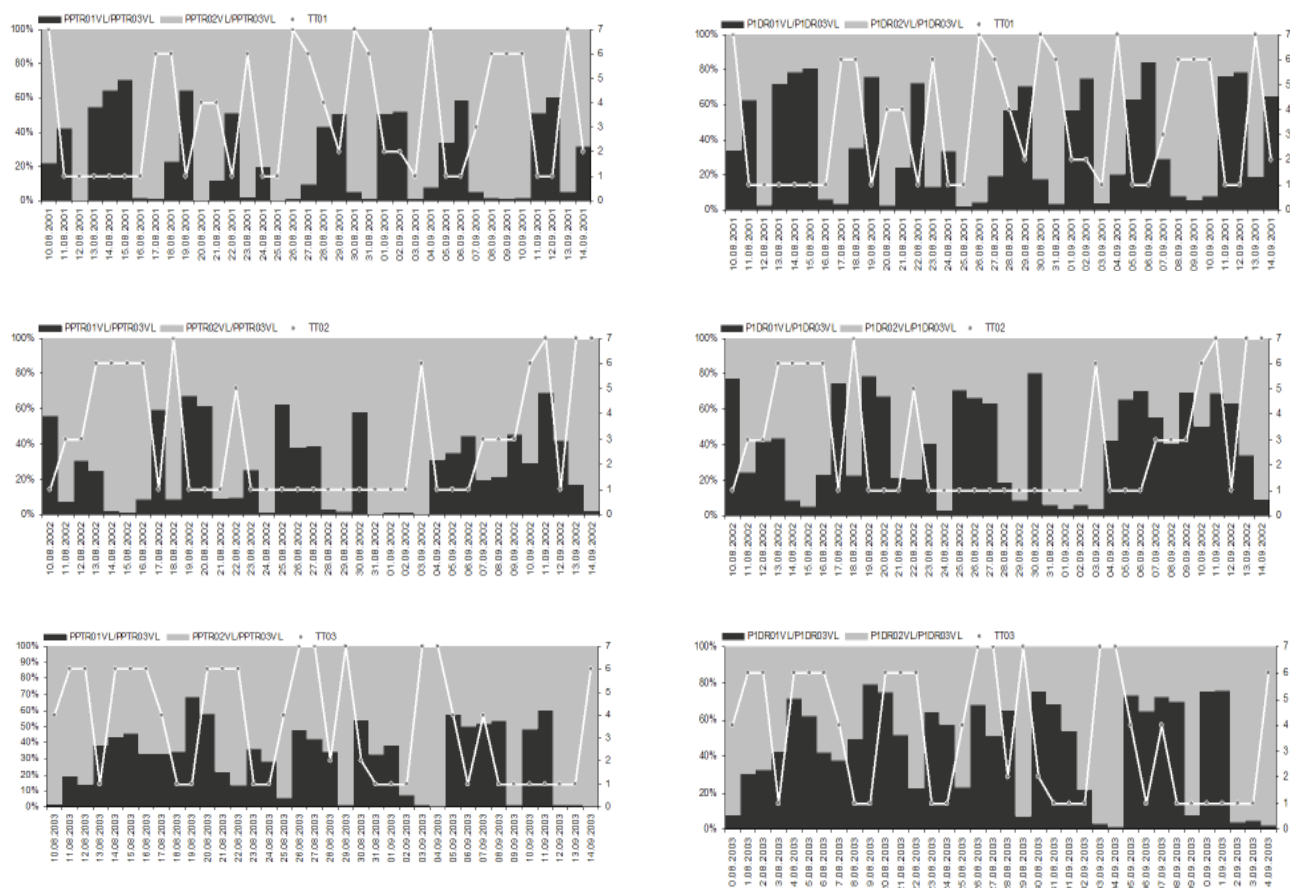
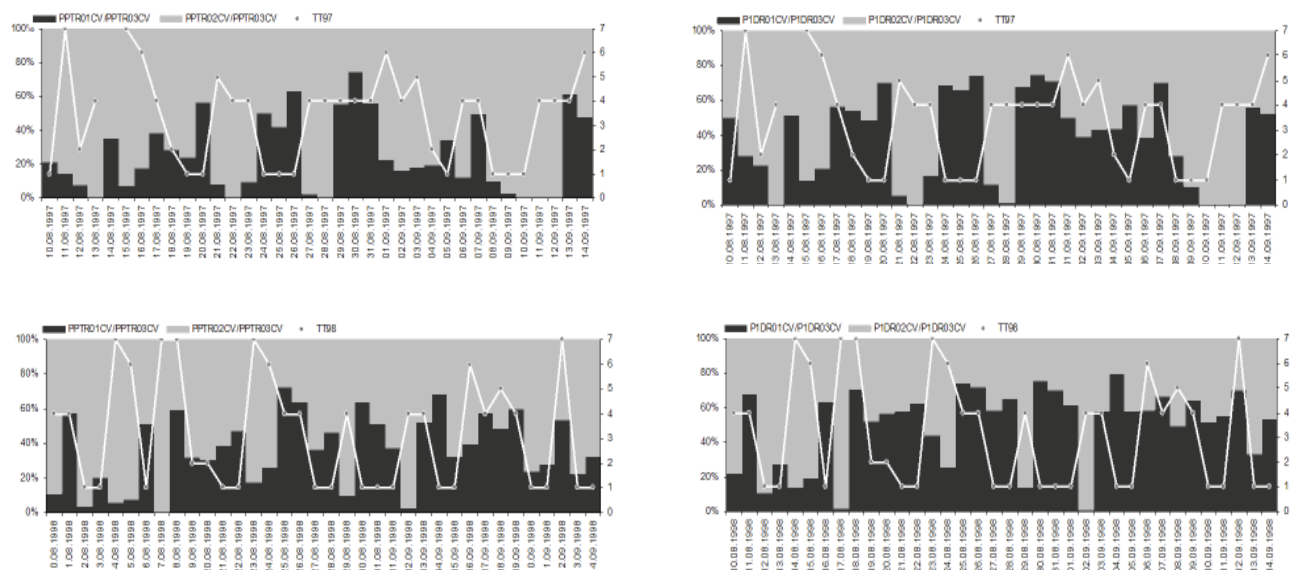


Figure 3.19 : Distribution en % de la part du flux de pollen local et extérieur sur le flux total de pollen simulé (colonne de gauche) et de la part de pollen local ou extérieur déposé sur le dépôt total (colonne de droite) par le modèle par année à la station VL



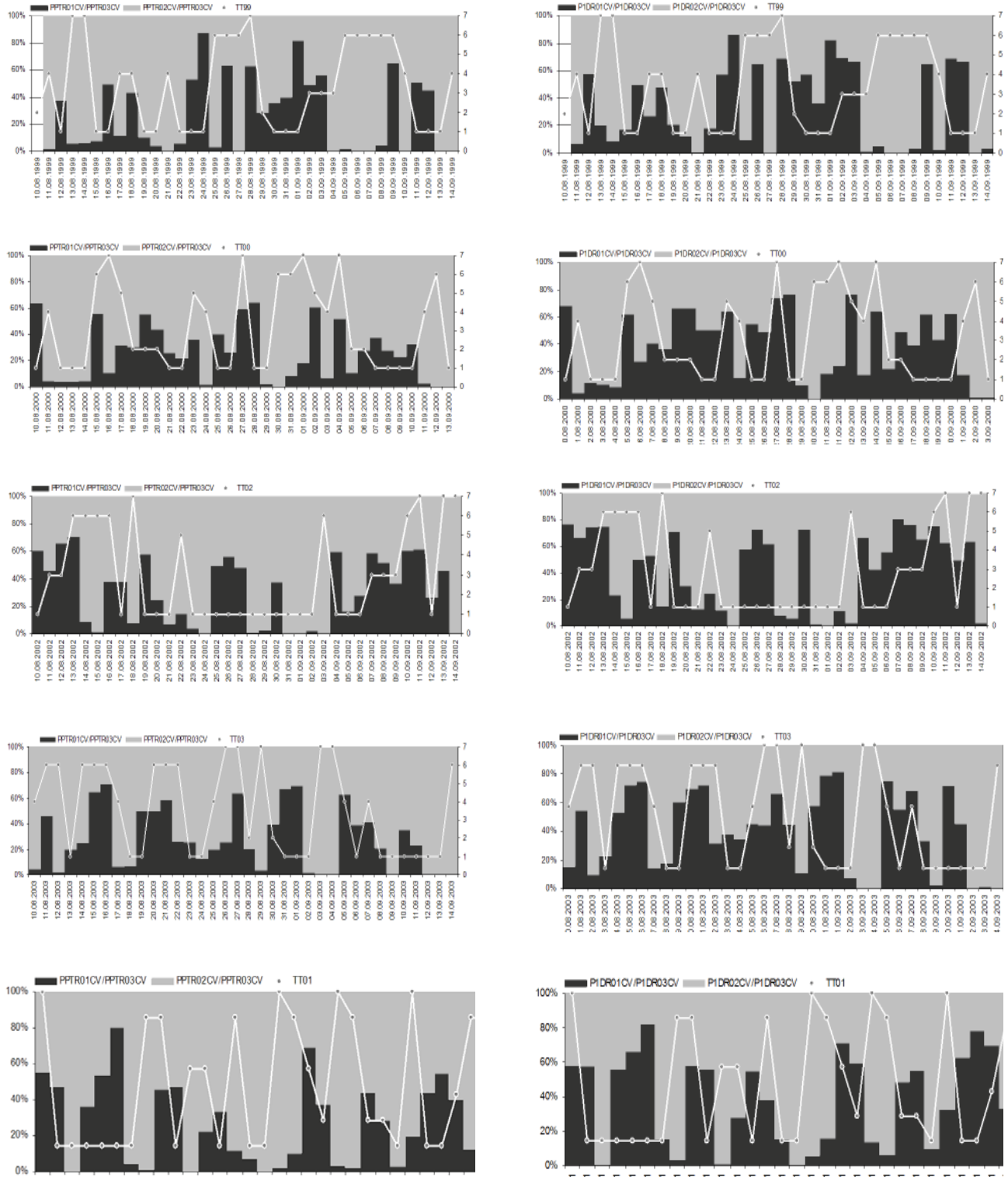
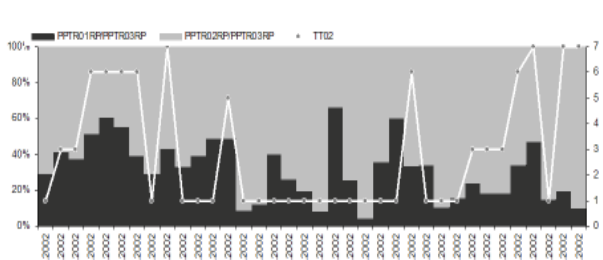
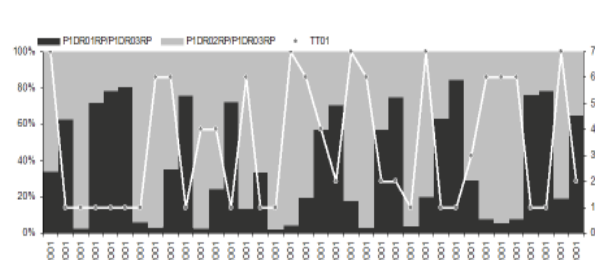
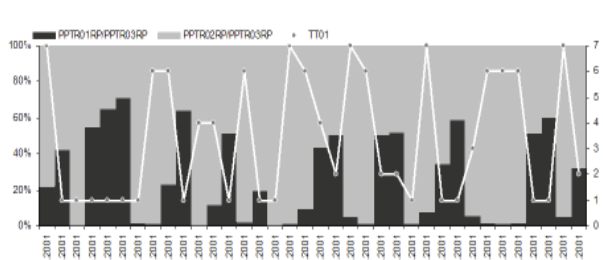
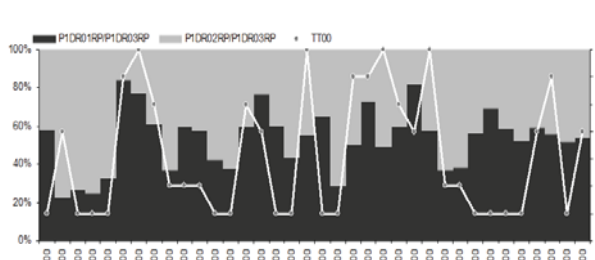
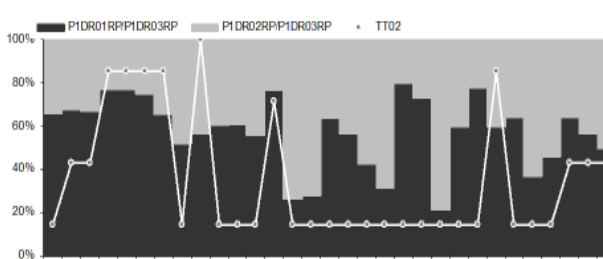
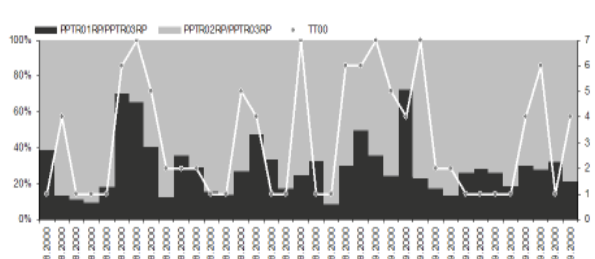
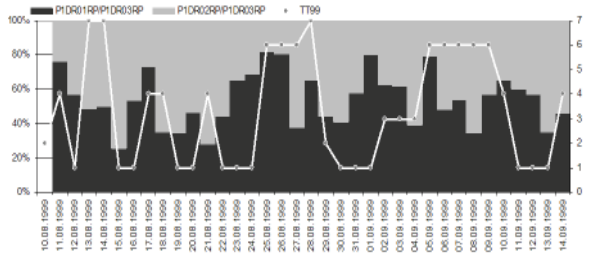
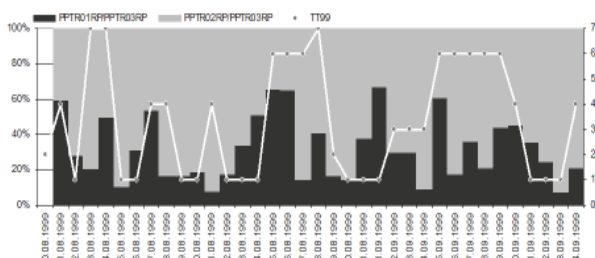
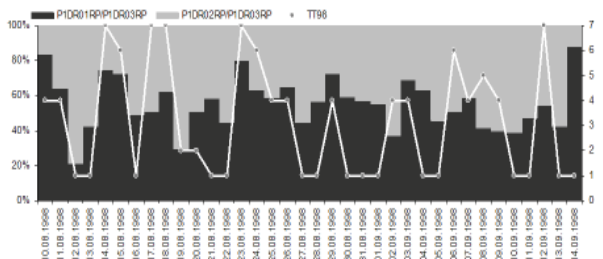
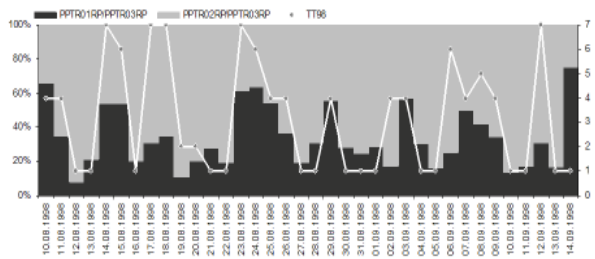
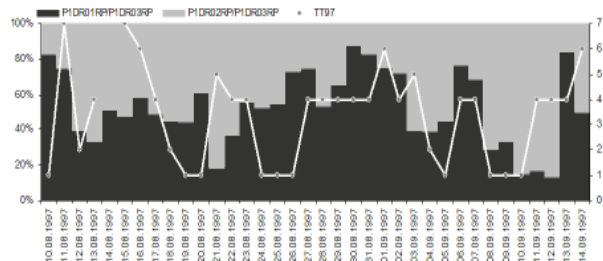
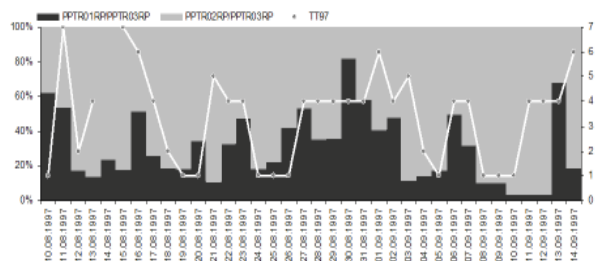


Figure 3.20 : Distribution en % de la part du flux de pollen local et extérieur sur le flux total de pollen simulé (colonne de gauche) et de la part de pollen local ou extérieur déposé sur le dépôt total (colonne de droite) par le modèle par année à la station CV



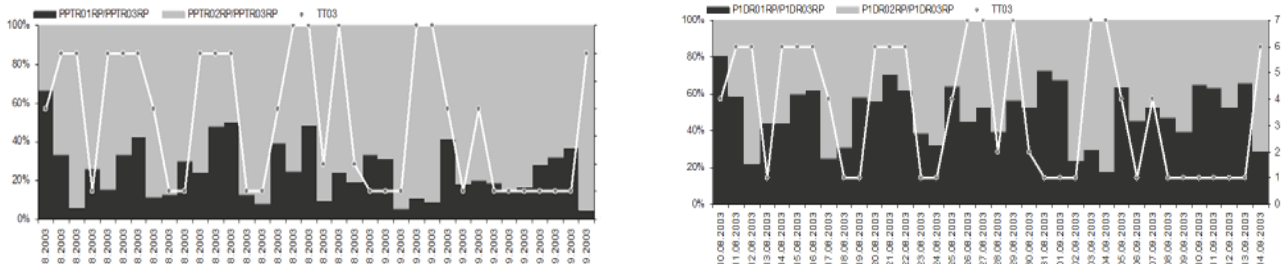


Figure 3.21 : Distribution en % de la part du flux de pollen local et extérieur sur le flux total de pollen simulé (colonne de gauche) et de la part de pollen local ou extérieur déposé sur le dépôt total (colonne de droite) par le modèle par année à la station Est

en revanche par les autres stations. Concernant le dépôt, la part de pollen local est nettement plus grande à cette station qu'aux trois autres.

En fin de compte, dans toutes les stations, les meilleures corrélations entre les concentrations mesurées et les paramètres météorologiques ont lieu avec la pression, de manière hautement significative ( $\alpha = 0.01$ ) et négative (Tableau 3.4) particulièrement bien marquée à l'Ouest, positive avec la température mais pas systématiquement en tous les sites et pas non plus aussi fortes, positive avec la direction du vent et notamment très forte à la station VL de même que négative avec la vitesse du vent mais seulement significative à VL. Si l'on se penche sur la décomposition de TR03 en TR01 et TR02, on peut noter qu'ils sont tous deux, la plupart du temps, bien corrélés négativement avec la pression à part en ce qui concerne TR01 à VL. Ce pollen extérieur est par ailleurs corrélé positivement avec la vitesse du vent et occasionnellement avec la direction du vent (négativement au CV et positivement dans l'Est). Mis à part au CV, la température n'a que peu d'effet apparent mais dans tous les cas les concentrations sont corrélées positivement avec l'humidité relative. Pour ce qui est du pollen local, les concentrations sont corrélées négativement avec la vitesse du vent dans tous les cas et positivement avec la direction du vent. En ce qui concerne la température, seule la station de l'Est présente une corrélation positive, de même que seule le CV montre une corrélation négative avec l'humidité relative.

Vitesse du vent		0.276	-0.229	0.207	-0.225	0.247
Direction du vent	0.201	0.191	0.186	-0.327		-0.28
Température	0.361		0.319		0.167	-0.191
Humidité relative		0.223		0.22		0.207

Tableau 3.4 : Coefficients de corrélation de Spearman ( $r_s$ ) pour  $\alpha = 0.01$  entre les concentrations (TR03, TR02, TR01) ou les valeurs de pollen déposées (DR03, DR02, DR01) et les principaux paramètres météorologiques

De ces observations, nous déduisons que globalement les concentrations polliniques augmentent lorsque la pression baisse, peu importe où l'on se trouve sur l'île ; que cette chute de la pression s'accompagne généralement d'une augmentation de la température et dans certains

cas de celle de l'humidité relative. La décomposition en part locale et part extérieure montre que les conditions météo ont des effets bien différents sur l'une ou sur l'autre. Ainsi les pollens extra locaux sont beaucoup plus influencés par la chute de pression, des vitesses de vent positivement corrélées, de même avec la température de l'air et le taux d'humidité relative avec une influence des vents de composante Est au CV et Ouest à la station Est. Il y a fort à parier que ces pollens augmentent en quantité sur chacun des sites à l'occasion de conditions associées au passage d'un front chaud ou déplacement de masses d'air chaud en provenance du Sud. En ce qui concerne les pollens insulaires, ils sont quant à eux aussi influencés négativement par la pression mais moins fortement. En ce qui concerne température et humidité, il n'existe pas de schéma bien clair. Quoiqu'il en soit la part de ces pollens tend à augmenter par vent plutôt calme, lorsque la pression baisse, le vent tourne à l'Ouest, l'air est plus sec et la température modérée.

Finalement, regardant le comportement des pollens qui se déposent au site de mesure, leurs quantités totales sont positivement corrélées avec la vitesse du vent dans l'Ouest, à VL et dans l'Est. Dans l'Ouest et à VL, la température montre aussi une corrélation positive. Au CV et dans l'Est, c'est l'humidité qui est positivement corrélée. Cela signifie que la quantité de pollen qui se dépose est fonction de la vitesse du vent essentiellement. Plus celle-ci est grande et plus les quantités sont élevées. La décomposition en pollen d'origine locale ou extra locale montre ensuite des situations inversées. En effet, dans le cas du pollen extra local (DR02), celui-ci augmente essentiellement lorsque le vent ralentit. Dans le cas du pollen local (DR01), son dépôt est accéléré sous l'effet de l'augmentation de la vitesse du vent, dans certains cas, la baisse de la pression et parfois aussi la chute des températures.

#### 4.3. Validation de la démarche

Il est possible de tirer un certain nombre de conclusions quant à la validité des données obtenues par la simulation, ainsi qu'un certain nombre de recommandations quant à l'interprétation possible des résultats. Nous sommes



relativement satisfaits du degré de précision avec lequel le modèle reproduit les situations météorologiques (Figures 3.7 à 3.11). Nous pouvons donc nous attendre à ce que ces conditions influencent les concentrations polliniques avec un bon degré de fiabilité par rapport à ce qui s'est réellement passé. Concernant les données polliniques et conscients des limites de la méthode employée, notamment pour la définition de la localisation des sources et la détermination des quantités saisonnières de pollen, nous sommes confiants que les concentrations de pollen enregistrées bien qu'en moyenne 10 fois plus faibles que dans la réalité, offrent une image fiable de ce qui se passe dans une région de la taille du domaine étudié qui serait coupée de toute autre source pollinique plus lointaine.

Les graphiques présentés dans les Figures 3.7 à 3.11 et 3.14 à 3.17 permettent d'afficher un certain optimisme quant à la capacité du MRCC à simuler le nuage pollinique de l'ambrosie sous l'influence de conditions atmosphériques variables. Nous avons pu noter que le nuage répond très bien au *stimulus* météorologique en général à part peut-être, en 2000, voire en 1999 à l'occasion d'événements rapprochés caractérisés par des situations de type tropical humide ou de transition. En effet, ces événements sont difficilement « captables » par le modèle du point de vue de leur impact sur les concentrations polliniques. Nous sommes cependant assurés que le comportement du nuage pollinique est proche de celui du nuage qui a été réellement échantillonné, c'est-à-dire que les pics et les creux de pollen sont influencés par les mêmes phénomènes mais avec des amplitudes complètement différentes. Ceci explique aussi pourquoi, si dans la réalité, le site de l'Ouest est le plus pollinique avec celui de l'Est, dans le modèle, ce site plus oriental est dominant. Nous pouvons remarquer lorsque nous regardons la part respective du pollen insulaire et celle du pollen extra local sur la concentration totale, que le site Est se comporte très différemment des trois autres. En effet, partout sur l'île, les fortes quantités de pollen sont fortement corrélées à la baisse de la pression atmosphérique, l'élévation de la température, l'augmentation de la vitesse du vent et de la nébulosité comme de l'humidité relative ainsi que des vents qui tournent au Sud ou à l'Ouest. Dans ces cas de figure, suivant quel est le type de temps dominant, la part de pollen d'une origine plus que l'autre va varier. Ainsi la plupart du temps, un type de temps tropical humide montre une part largement dominante de pollens extérieurs alors que dans le cas d'un type tempéré sec, ce sont les pollens de l'île qui sont les plus nombreux. Dans le cas de la station Est, ces observations concernant la déposition, valables dans les trois autres sites, sont ici inversées. Cela peut signifier deux choses. La première possible est la présence d'une source très proche tellement influente qu'elle inhibe l'effet de « nuage » mais dans ce cas là, on se trouverait toujours dans la situation du pollen local dominant or ce n'est pas non plus le cas.

Nous pourrions donc envisager, que cette station étant la plus nord orientale du domaine, reflète à petite échelle, ce que devrait connaître les autres stations si du pollen venant de l'extérieur du domaine pouvait être capturé. L'île de Montréal est orientée selon le sens dominant des vents de cette période de l'année, SO-NE, si bien que ce site est sous l'influence directe du pollen de l'île soulevé et déplacé par les mouvements des masses d'air venant du Sud et qui sont dans la réalité « chargés » de pollens extra frontaliers.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous attardons à une situation estivale typique de manière à voir ce qui se passe à plus fine échelle pendant 3 journées. Nous analysons ce qu'il se passe à l'occasion d'une situation de type tropical humide suivie d'un changement de temps. Nous comptons mettre ainsi à jour ce qui explique que certaines de ces situations sont plus porteuses en pollen que d'autres et nous souhaitons illustrer à cet égard l'évolution spatiale du risque associé à ces situations. Dans tous les cas, nous porterons également une attention à l'effet des cours d'eau sur la circulation et le développement du nuage pollinique. Mais avant tout, nous nous intéressons au cycle diurne de la pollinisation telle que simulée par le modèle.

## 5. Evolution spatio-temporelle d'un nuage d'ambrosie : situations atmosphériques typiques et analyse

### 5.1. Le cycle diurne de la pollinisation de l'ambrosie dans le MRCC

La question du paramétrage du cycle diurne a été abordée dans la section 4.1.2. Dans cette section, nous souhaitons seulement mettre en évidence pour chacun des 4 points de mesure que nous avons retenus, quelle est l'allure de ce cycle de jour en jour (Figure 3.22). Pour cela nous extrayons les données simulées toutes les 15 minutes durant 24 heures et nous présentons les courbes. Il s'agit ici de présenter la courbe diurne d'émission du pollen qui, selon où l'on se trouve, se compose soit de pollen local (insulaire), soit de pollen extra local (reste du domaine). Le paramètre SF03 correspond à ce flux d'émission total en grains/m<sup>2</sup>/s.

D'un site de mesure à l'autre les quantités de pollen émises sont fort variables mais elles suivent pour un point de grille du modèle, de jour en jour, toujours le même profil. Les sites Ouest et Est sont les plus polliniques, en accord avec la carte de localisation des sources (Figure 3.3 a et b). Vient ensuite le site de VL puis celui du CV quasiment indétectable tant les quantités de pollen émises



au centre ville sont faibles. Dans tous les cas, l'émission à proprement parler commence autour de 04 :30 HAE, culmine vers 09 :30 puis diminue progressivement pour revenir au niveau initial après 14 :30. La Figure 3.23 a et b présente pour le moment du pic maximum de pollinisation, la représentation spatiale des champs d'émission, hors de l'île (a) et dans l'île (b). Il faut noter que l'homogénéité du flux mesuré hors de l'île est liée au fait que la grille de référence spatiale de l'occupation du sol est au degré, ce qui correspond à 45° de latitude, à une résolution entre deux points de grille de 100 à 110 km, ce qui est trop grossier pour prendre en compte des différences.

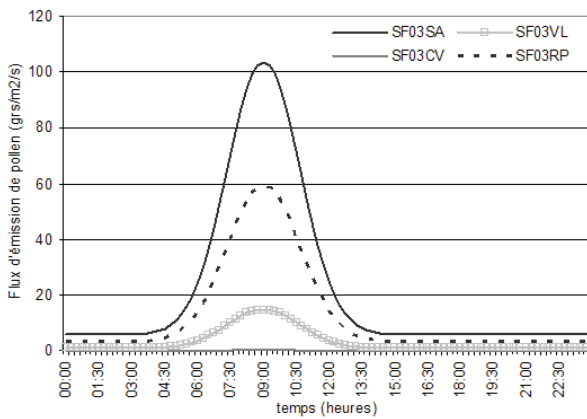


Figure 3.22 : Courbes d'émission quotidiennes à chacune des stations

Nous référant à la revue de la littérature proposée dans le chapitre 1, nous pouvons dire que ce cycle est tout à fait représentatif des conditions moyennes d'émission de ce pollen dans la nature. Cependant, du fait qu'il ne varie pas de jour en jour puisqu'il a été paramétré de la sorte dans le cadre de cette étude exploratoire, il n'est pas possible d'envisager au cours d'une saison donnée, une journée sans émission ou avec des émissions beaucoup plus abondantes du fait de l'influence de conditions atmosphériques particulières ou encore de l'impact des conditions d'un printemps différent qui ont des implications sur la phénologie de la plante donc sa capacité à produire et émettre du pollen. Ce cycle diurne précisé, il est dorénavant intéressant de se pencher sur quelques unes des situations particulières.

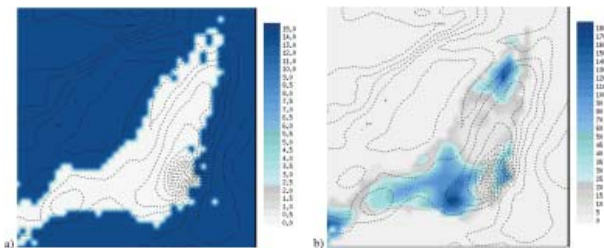


Figure 3.23 : Champs d'émission du pollen (a) hors de l'île, SF02 et (b) dans l'île SF01 au moment du pic d'émission. Les échelles sont en grains de pollen/m²/s

Nous avons constaté, que les journées les plus polliniques, ont toutes un dénominateur commun, qui est la baisse avérée de la pression atmosphérique. Ensuite suivant les cas, soit il peut s'agir d'un type de temps tempéré sec qui se trouve à l'avant d'un front chaud. Ce type de temps de nature anticyclonique s'avère relativement pollinique lorsque les conditions anticycloniques sont en voie de se dégrader quelque peu au profit d'une situation plus instable, de type tropical humide ou encore lors d'un changement radical de masse d'air (type de transition). Nous avons aussi noté que selon que le type de temps est tempéré sec (TT1), tropical sec (TT3) voire même polaire sec (TT2) dans une certaine mesure, alors les pollens locaux sont prévalents. Dans le cas des journées plus humides telles que tropicales humides (TT6), la charge pollinique est très fortement influencée par les pollens extra locaux et potentiellement lointains.

5.2. Une situation estivale typique : journées des 26 au 28/08/1999

La Figure 3.24 permet de localiser dans le temps les trois journées d'intérêt sur les courbes des concentrations polliniques observées. Il s'agit de deux journées de type tropical humide suivies d'une journée marquée par un changement de masse d'air. Comme nous pouvons le remarquer, il s'agit d'une période pendant laquelle la pollinisation fut particulièrement intense dans l'Ouest de l'île. Bien moins intense certes ailleurs dans l'île, elle n'en demeure pas moins, élevée et correspond, pour les trois sites à l'étude, à la plus forte période de la saison. Le graphique des courbes polliniques simulées montre quant à lui que le pic majeur de l'Ouest n'est absolument pas simulé par le MRCC mais qu'en revanche les autres le sont.

La Figure 3.25 présente un zoom sur les 3 jours analysés après élimination de la station Ouest (ou SA). Nous pouvons remarquer qu'en dépit du facteur 10 de différence, observations et simulations ne sont pas si éloignées l'une de l'autre. Il y a certes des différences mais par exemple, le 28 août, journée de type de temps de transition, l'ordre des stations est conservé par la simulation. La station CV est la plus pollinique suivie de l'Est puis de VL.

i. Conditions atmosphériques

La Figure 3.26 présente les conditions atmosphériques qui ont prévalu durant ces trois journées. Elles s'accompagnent d'une forte baisse de la pression atmosphérique tout au long de la période (courbe pointillée noire). Elle demeure encore élevée au cours du jour 1 mais atteint un minimum au cours de l'après midi du jour 3. Entre temps, elle baisse sans arrêt, d'abord assez légèrement entre le jour 1 et le jour 2 puis en s'intensifiant. La courbe de la température de l'air (trait plein gris clair) laisse apparaître trois cycles diurnes avec les maxima atteints chaque jour entre 15

et 16 :00. Il est à noter que même si cette augmentation n'est pas si forte, la tendance à la croissance est là. De jour en jour, elle monte. Il y a quand même presque 5°C de différence entre le début de la pollinisation du jour 1 et celui du jour 3. Concernant la vitesse du vent (trait noir plein), nous assistons jusqu'à midi du jour 1 à une très forte décroissance pour être quasi nulle à midi de ce jour-là. Cette chute est aussitôt suivie d'une augmentation brutale et soutenue de celle-ci jusqu'à l'apogée de l'émission pollinique du jour 2. Dès lors la vitesse tombe de nouveau jusqu'à un niveau de petite brise autour de 4 m/s. A partir de 13 :30, elle augmente de nouveau et atteint cette fois plus de 7.5 m/s dans le courant de la nuit. Elle est encore très élevée quand débute l'émission pollinique du troisième jour puis chute en courant de matinée jusqu'à 10 :30.

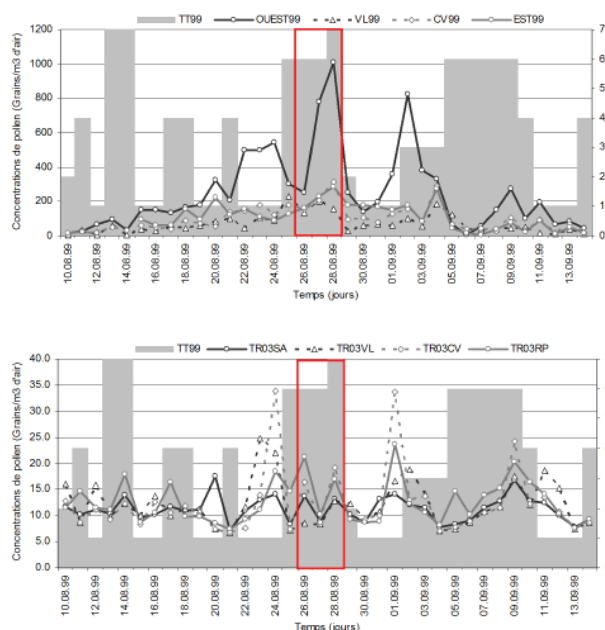


Figure 3.24 : Courbes des concentrations polliniques quotidiennes mesurées (en haut) et simulées (en bas) durant la saison 1999. Le cadre rouge localise les trois journées d'intérêt. L'axe de droite indique la numérotation des types de temps

A partir de là, elle se stabilise autour de 4 m/s jusqu'à 16 :00, moment à partir duquel elle augmente de nouveau drastiquement pour atteindre un paroxysme en pleine nuit à plus de 9 m/s. Concernant la provenance de ce vent, il est plutôt du SO durant le premier cycle pollinique, puis du SSE durant le second et finalement tourne au plein Ouest à ONO lors du troisième pic. Pour résumer, nous nous trouvons dans une période durant laquelle la pression baisse de façon significative, la température de l'air tend à augmenter et à être assez chaude, la vitesse du vent augmente globalement durant toute la période et enfin l'humidité relative croît également au fil du temps. Il ne fait pas de doute que cette conjonction de temps correspond au passage d'un front chaud sur Montréal. La situation synoptique de ces trois jours est illustrée à l'Annexe 3.6.

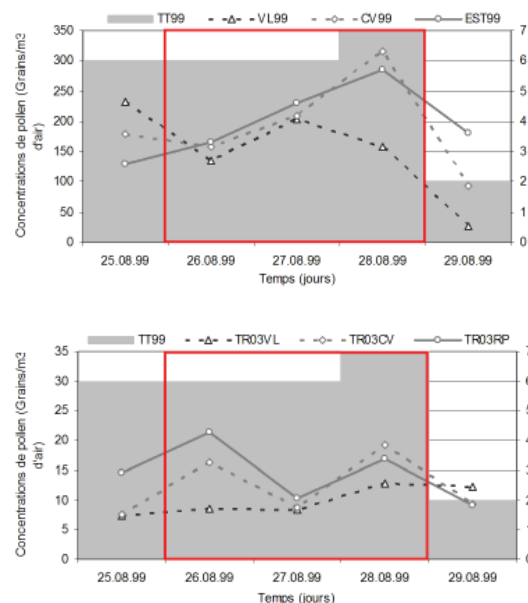


Figure 3.25 : Zoom sur les courbes des concentrations polliniques quotidiennes mesurées (à gauche) et simulées (à droite) durant la période du 25 au 29 août 1999. Le cadre rouge identifie les trois journées d'intérêt. L'axe de droite indique la numérotation des types de temps

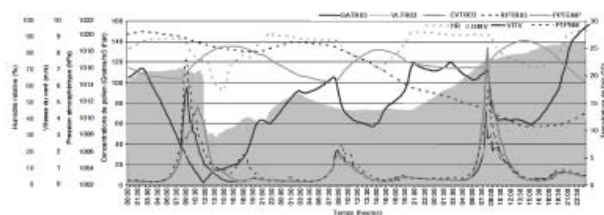


Figure 3.26 : Description météorologique des journées des 26 au 28 août 1999 telles que simulées par le MRCC

ii. Rythmes polliniques

La Figure 3.27 présente ces trois journées plus en détail d'un point de vue pollinique. Elle se compose de 3 graphiques. Le premier concerne l'émission du pollen. On reconnaît parfaitement la reproduction de jour en jour d'un cycle diurne semblable par station. Le second affirme les valeurs de concentrations mesurées à chacun des points de mesure et l'on distingue dès lors des différences entre stations et dans le temps également. Enfin, le dernier graphique correspond aux quantités de pollen déposées en ces mêmes points de mesure. Il est ainsi possible de remarquer dans le second graphique que les concentrations mesurées entre 05 :00 et 19 :00 HAE peuvent fluctuer beaucoup d'un site de mesure à l'autre. Ainsi le jour 2 est beaucoup moins pollinique que le premier et le troisième. Il s'agit du jour qui présente la température la plus basse de la série résultant d'un ennuagement plus marqué ce jour-ci.

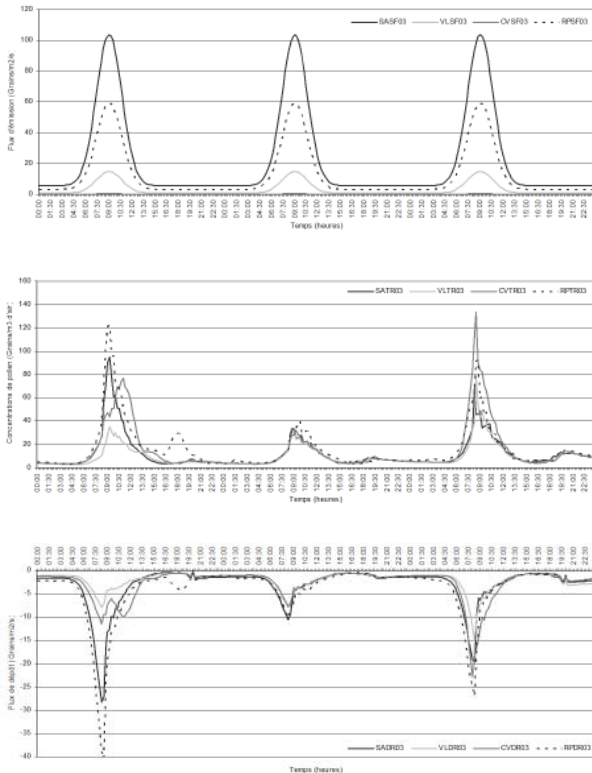


Figure 3.27 : Description pollinique des journées des 26 au 28 août 1999 telles que simulées par le MRCC

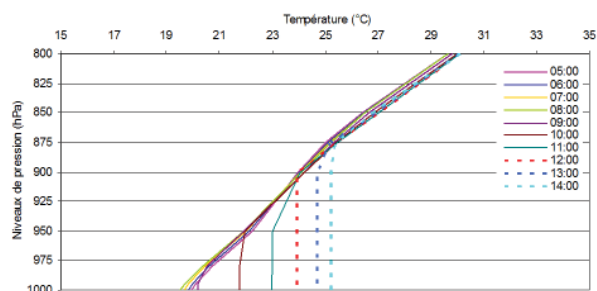
A l'inverse, la journée du 28/08/99 est la plus ensoleillée, la plus chaude et la plus venteuse également. C'est à cette occasion qu'a lieu le pic majeur dans l'Ouest de l'île dans la réalité, pic que l'on trouve avec le modèle au niveau du centre ville. Remarquons également que le 26/08, les concentrations non négligeables sont surtout au profit de l'Est et de l'Ouest. Notons ensuite un décalage dans le temps au CV. Alors que la plupart du temps, le pic maximal est atteint en un site donné à peu près au moment où la production pollinique est maximale, ce jour-là présente une particularité au centre ville. Le pic de pollen a lieu près de 2 heures plus tard qu'à l'Ouest et dans l'Est. Dans tous les cas, notons que le pic a généralement lieu dès que la température de l'air s'élève de nouveau, après la baisse nocturne, soit une fois que la couche limite atmosphérique commence à se développer dans la verticale et au moment également où l'humidité relative contenue dans l'air se met à baisser de manière significative (Figure 3.26).

Afin d'expliquer le décalage observé au CV le 26/08/99, nous nous référons aux profils verticaux de la température potentielle présentés à la Figure 3.28. Ils ont été produits afin de caractériser l'état de stabilité de l'atmosphère. La colonne de gauche présente les profils des 3 jours à la station Ouest et ceux de la colonne de droite sont ceux du CV. Le premier graphique (26/08 à l'Ouest) permet de noter un phénomène tout à fait intéressant. En effet de 5 :00 à 09 :00 du matin, la basse atmosphère est stable. La température potentielle croît avec l'altitude.

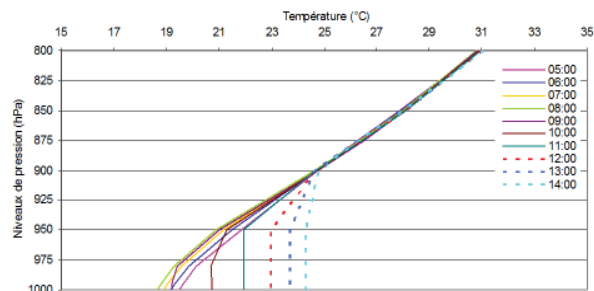
Les sites tels que l'Ouest et l'Est se situent dans des régions où l'ambrosie est abondante. Ce n'est pas le cas du CV. Ainsi nous pouvons penser qu'en dépit de ces conditions peu favorables au vol du pollen, du fait de la proximité des sources, ces sites connaissent néanmoins des concentrations relativement élevées. Dans le cas du CV, la situation est autre. En effet, ce site étant plus éloigné des centres producteurs, il doit attendre de meilleures conditions pour connaître à son tour des concentrations non négligeables. C'est pourquoi le pollen arrive plus tardivement. Ce jour là, l'inversion thermique se lève entre 09 :00 et 10 :00, offrant alors seulement, la possibilité au pollen d'être pris en charge par l'atmosphère et de se déplacer. Le pic principal se produit vers 11 :00, soit 2 heures après les stations les plus polliniques. Ce phénomène explique de la même manière le fait que certaines quantités de pollen se déposent au CV plus tard qu'ailleurs.

De la même façon qu'il a été possible d'extraire du MRCC des profils de température potentielle, il en a été fait de même avec les concentrations polliniques (Figure 3.29) sous la même forme et dans le même ordre que dans la Figure 3.28. Il est aussi possible d'analyser ainsi le comportement du nuage de pollen à différentes heures de la matinée et de la journée en fonction de l'altitude. C'est ainsi que nous pouvons effectivement voir que les concentrations maximales atteintes dans l'Ouest sont beaucoup plus importantes qu'au CV mais qu'en revanche, elles diminuent assez vite une fois le pic atteint. A midi, on ne compte plus que 20 grains/m<sup>3</sup> d'air dans une couche de mélange développée sur un peu plus de 300 mètres. Au CV le maximum est atteint à 11 heures dans une couche de mélange d'épaisseur semblable à la situation dans l'Ouest. A midi, alors qu'à l'Ouest les concentrations sont faibles, elles demeurent élevées en CV, puis se mettent à régresser en début d'après midi. On note que le profil de la température potentielle est vertical sur toute l'épaisseur de la couche laissant entendre que le brassage a lieu mais qu'en revanche, le CV n'est plus alimenté en pollen. De fait, les concentrations baissent.

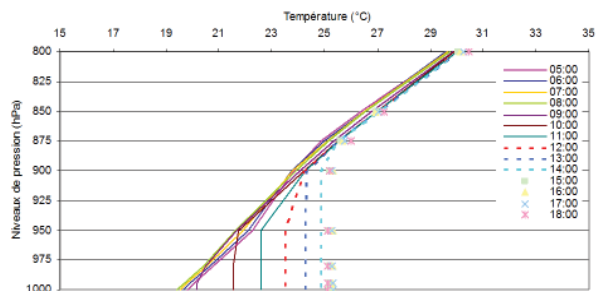
Le jour 2 connaît inversement de très faibles concentrations polliniques. Les profils de la température potentielle sont assez semblables dans les deux sites et laissent apparaître une stabilité relativement plus forte que la veille jusqu'à 09 :00 HAE. Les températures sont en effet plus fraîches à la surface, générant un gradient thermique plus fort avec l'altitude. Les pics sont tous en phase avec la levée de l'inversion thermique autour de 09 :00 HAE mais sont tous aussi d'ampleur plutôt limitée. Ainsi le maximum atteint ce jour là à l'Ouest, correspond à la moitié de ce qu'il a été la veille. Même si les conditions aux deux sites semblent semblables, notons cependant une couche de mélange un peu plus développée au centre ville qu'à l'Ouest. Elle est de plus de 600 mètres à midi au CV contre moins de 200 mètres à l'Ouest. Afin d'expliquer



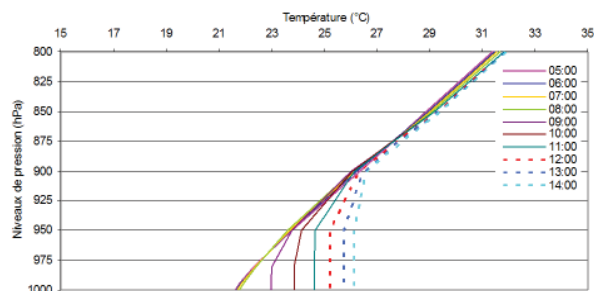
Jour 1 : 26/08/99



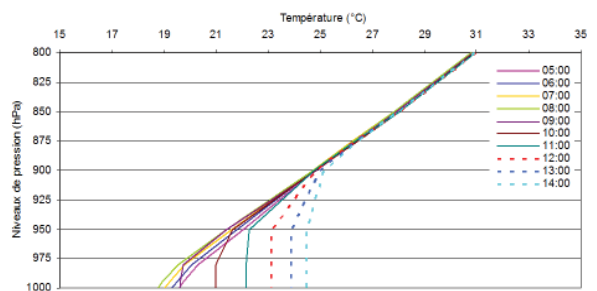
Jour 2 : 27/08/99



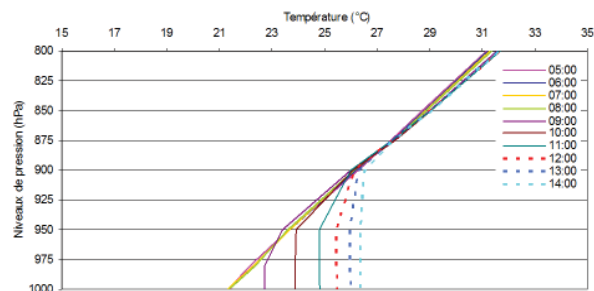
Jour 1 : 26/08/99



Jour 3 : 28/08/99



Jour 2 : 27/08/99



Jour 3 : 28/08/99

Figure 3.28 : Profils verticaux de la température potentielle extraite à la station Ouest (gauche) et au centre ville (droite)

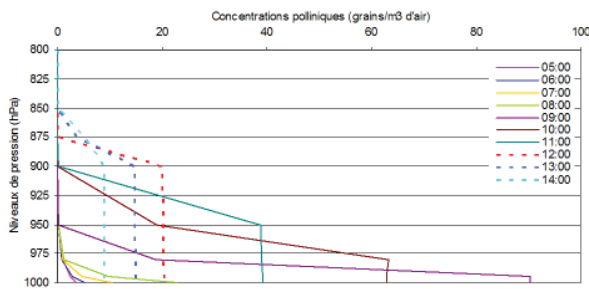
ceci, la Figure 3.31 présente quelques coupes verticales tant des concentrations de pollen que du mouvement vertical à 09 :00 du matin au moment du maximum de pollen. En effet, nous suspectons que la couche limite urbaine est plus développée dans la verticale sous l'effet de l'existence de mouvements verticaux. Nous pouvons constater deux choses. La première, la plus frappante, est l'effet des cours d'eau. Très visible sur l'image (d). Cette journée là est en effet plus fraîche à la surface que la précédente. Or, il a déjà été précisé, que la température des cours d'eau était prescrite à 20°C. Dans le cas présent, nous pouvons parfaitement bien distinguer une ceinture de mouvements verticaux le long de ces axes. La température de l'eau étant plus chaude que son environnement, elle génère de la convection au-dessus d'elle. Ces zones plus chaudes ont pour effet de créer des sortes de cheminées qui propulsent le pollen plus haut en altitude lorsqu'il y en a. Ce phénomène est encore plus perceptible à la Figure 3.30 qui présente des coupes semblables pour la

première journée à 11 :00. Cette journée étant nettement plus pollinique que la suivante, les phénomènes sont plus facilement détectables.

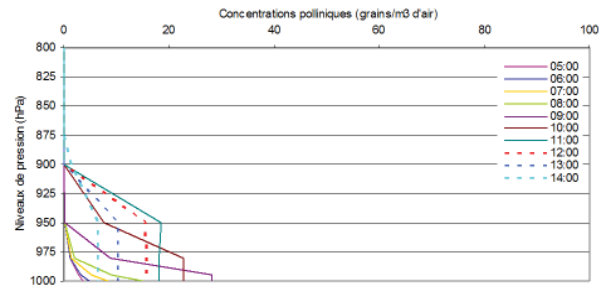
Seul le site le plus oriental perçoit encore quelques pollens un peu après les autres autour de 12 :00. Il y a des chances pour que la raison soit toujours la même que précédemment, à savoir qu'il enregistre du pollen qui arrive de plus loin.

Enfin, le troisième jour apparaît plus homogène dans l'allure de son pic principal. Les profils de la température potentielle s'apparentent assez à ceux du jour précédent tant dans la force de l'inversion que dans les rythmes. Dans ce cas, dès 09 :00 HAE, l'inversion nocturne se lève sur quelques mètres puis se développe certes moins que dans le cas du jour 1 mais assez haut et assez tôt pour permettre des concentrations de pollens importantes. La température de l'air est la plus chaude peu importe

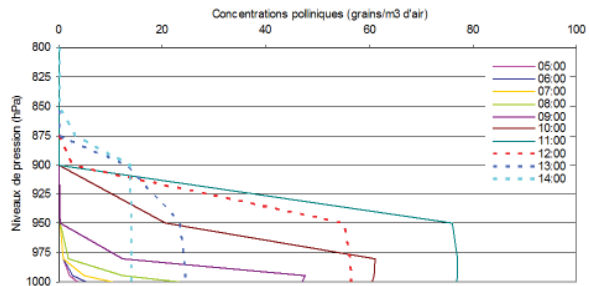




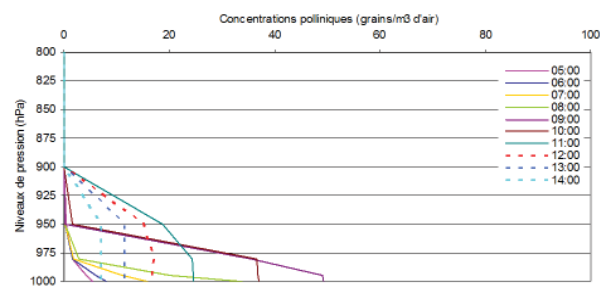
Jour 1 : 26/08/99



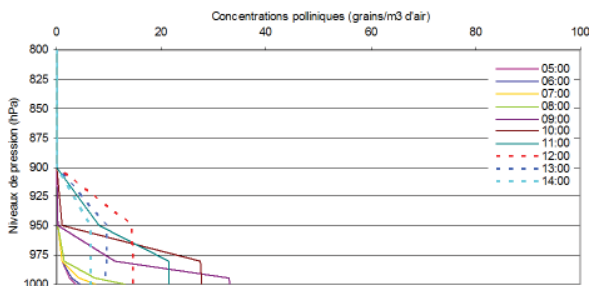
Jour 2 : 27/08/99



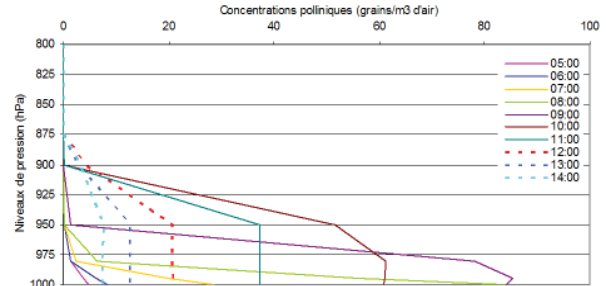
Jour 1 : 26/08/99



Jour 3 : 28/08/99



Jour 2 : 27/08/99



Jour 3 : 28/08/99

Figure 3.29 : Profils verticaux de la concentration pollinique extraite à la station Ouest (gauche) et au centre ville (droite)

l'heure de la journée comparativement aux deux autres journées. Dans ce cas-là, c'est le CV qui enregistre les plus fortes concentrations. Le vent est passé au SO, sa vitesse a augmenté (Figure 3.26) juste en tout début de journée, permettant d'initier l'émission et la prise en charge rapide du pollen. Ce facteur associé à la levée de l'inversion thermique contribue à générer une atmosphère relativement turbulente. Il est fort probable que ces conditions favorisent l'arrivée rapide et abondante de pollen au CV. Ce qui n'avait pas été le cas le premier jour du fait aussi d'une vitesse du vent beaucoup plus faible au moment de l'émission maximale. Autour de 13 :30, les concentrations sont de retour à peu près à la normale. Notons ici de nouveau, encore plus tard, entre 19 :30 et 22 :30 HAE, un pic secondaire atténué. Il est en phase avec la recrudescence de la vitesse du vent, les températures les plus fortes de même que le creux barométrique. Relevons ici qu'à l'inverse du jour 2, cette journée est particulièrement chaude. Cette constatation

nous amène à dire que lorsque les surfaces sont bien réchauffées, elles prennent le relais des rivières dans les processus d'ascension des pollens et le mécanisme s'inverse au dessus des cours d'eau. La Figure 3.32 illustre parfaitement bien cet effet sur les mouvements verticaux et de fait, sur l'élévation des pollens dans l'atmosphère. On voit particulièrement bien cet effet sur la Figure 3.32b dans la zone de maximum de concentration et maximum de développement vertical de la couche de mélange.

Cette séquence de trois jours est très intéressante car bien que présentant des caractères assez semblables d'un jour à l'autre (2 journées tropicales humides suivie d'une journée de transition), on se rend compte à quel point les effets de fluctuations, mêmes infimes, des conditions atmosphériques, peuvent modifier complètement le patron de dispersion du nuage pollinique au-dessus d'un site donné. Il semble que la température de l'air soit le facteur déterminant des différences de concentrations



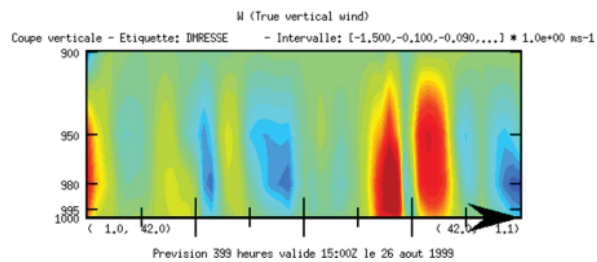
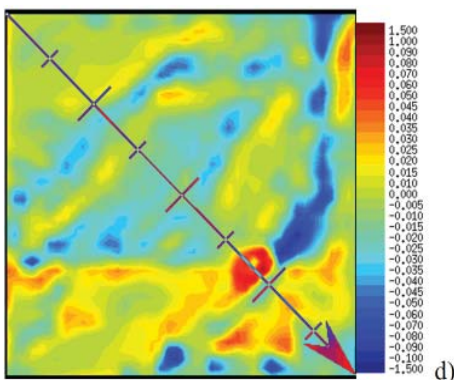
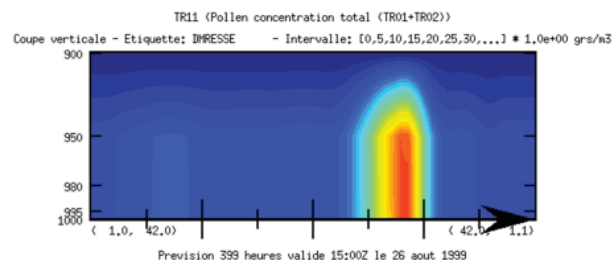
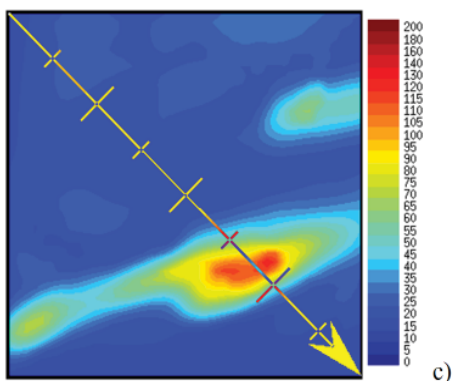
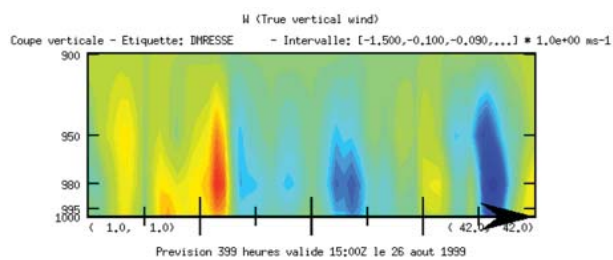
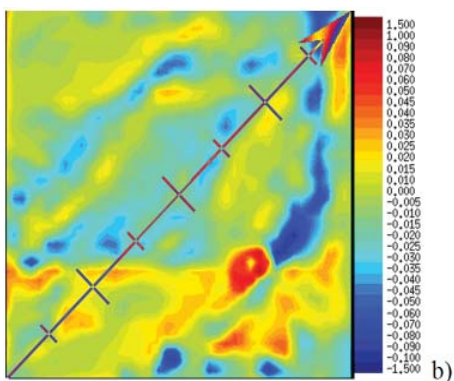
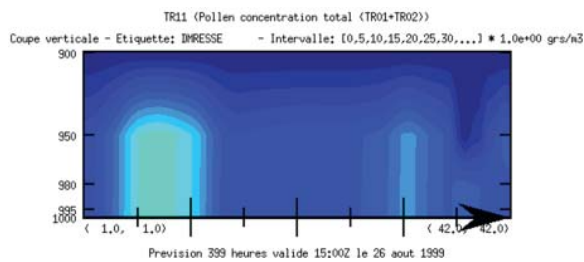
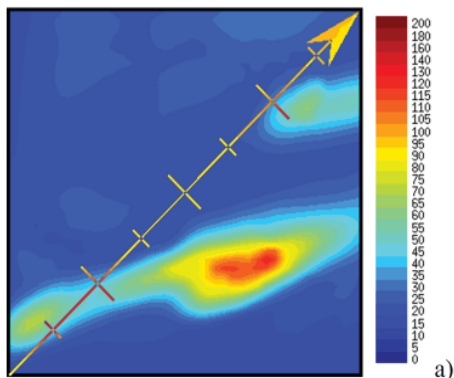
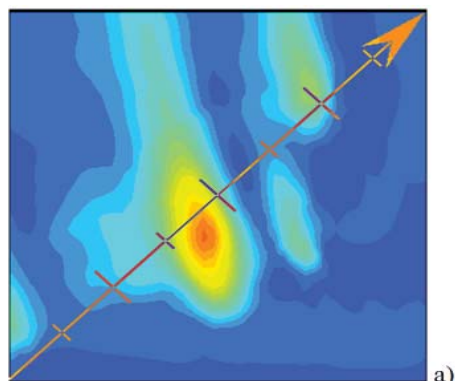
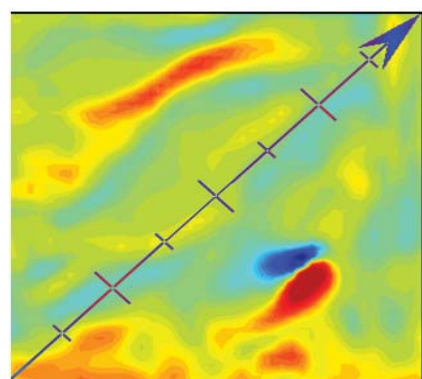
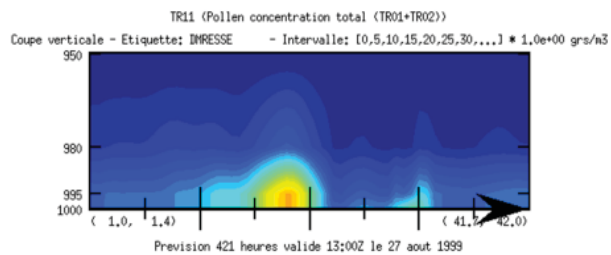


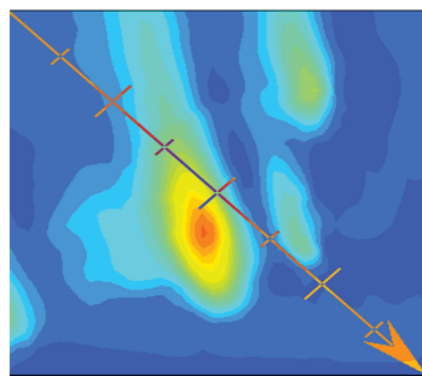
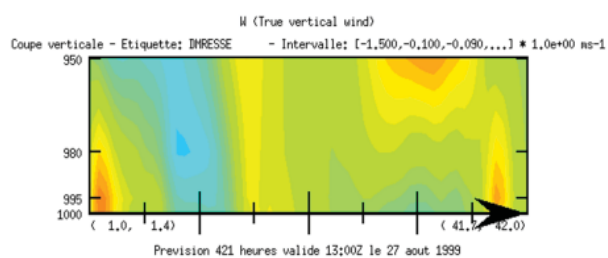
Figure 3.30 : Coupes transversales des concentrations polliniques en grains/m<sup>3</sup> d'air (a et c) et des mouvements verticaux en cm/s (b et d) représentés par la variable ppw à 11 :00 HAE le 26/08/99



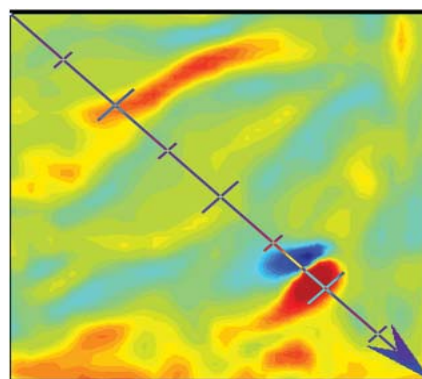
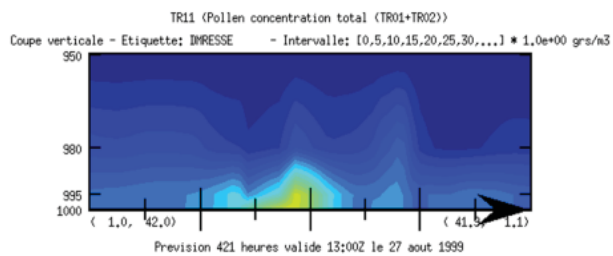
a)



b)



c)



d)

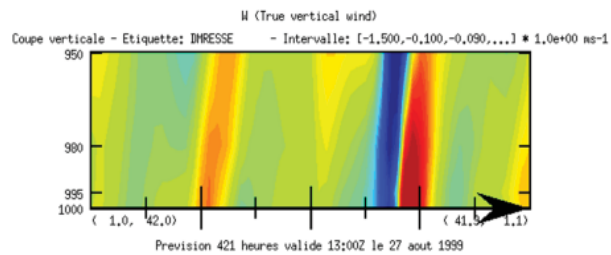


Figure 3.31 : Coupes transversales des concentrations polliniques en grains/m<sup>3</sup> d'air (a et c) et des mouvements verticaux en cm/s (b et d) représentés par la variable ppw à 09 :00 HAE le 27/08/99

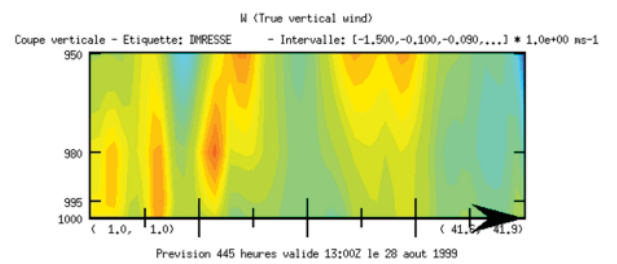
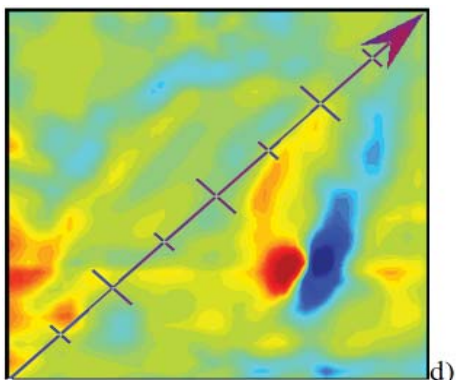
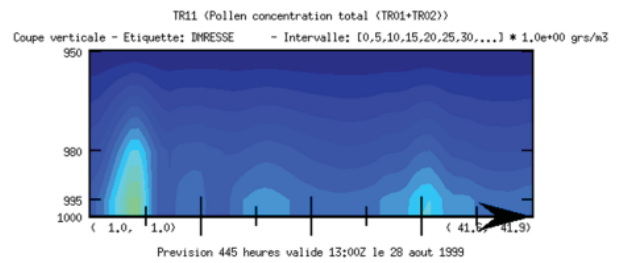
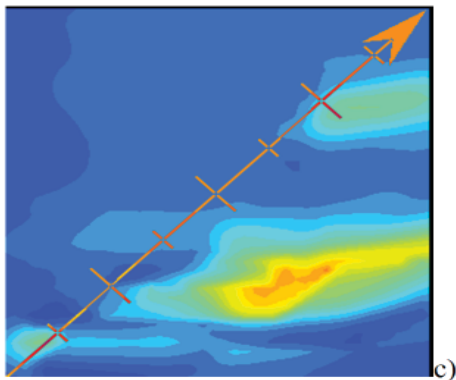
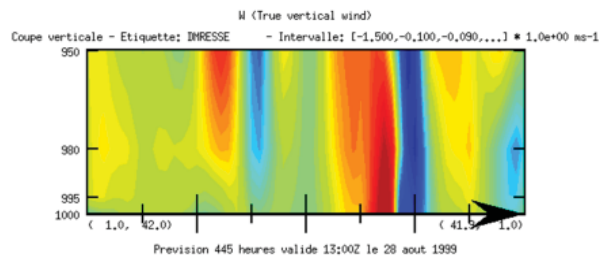
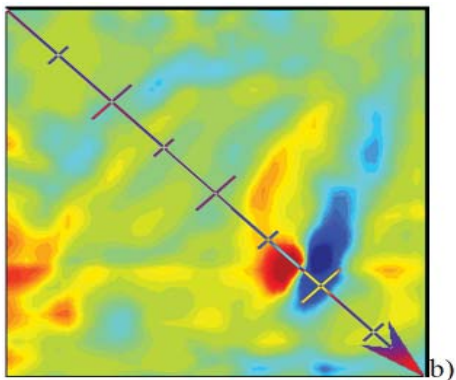
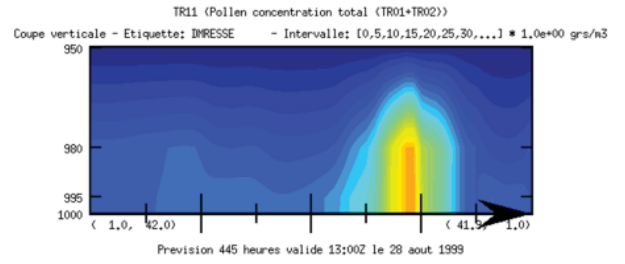
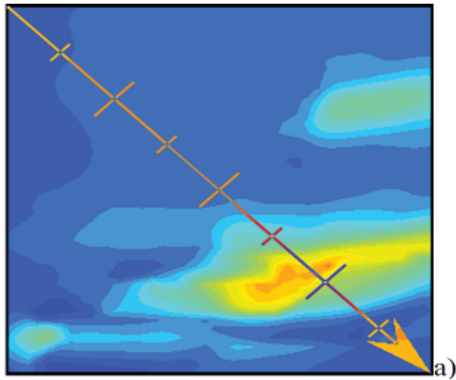
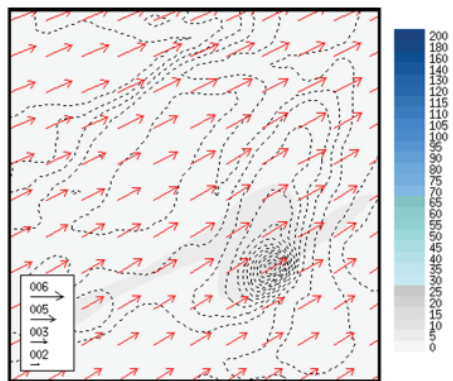
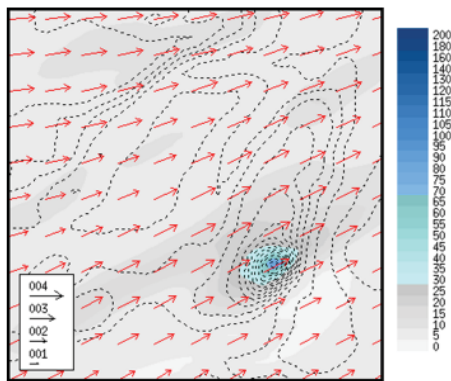


Figure 3.32 : Coupes transversales des concentrations polliniques en grains/m<sup>3</sup> d'air (a et c) et des mouvements verticaux en cm/s (b et d) représentés par la variable ppw à 09 :00 HAE le 28/08/99

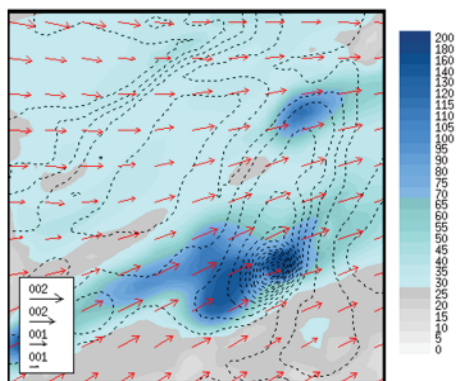




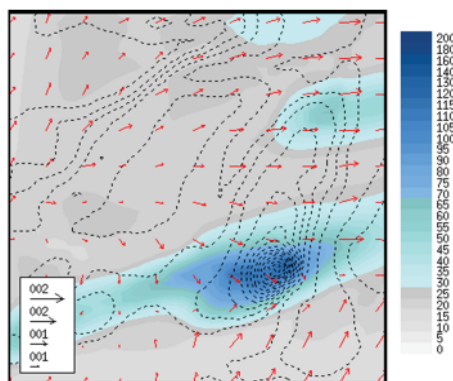
05 :00 HAE 26/08/99



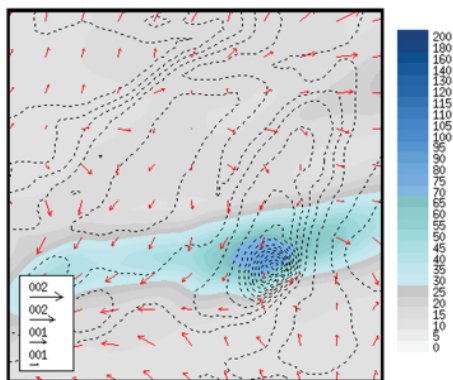
07 :00 HAE 26/08/99



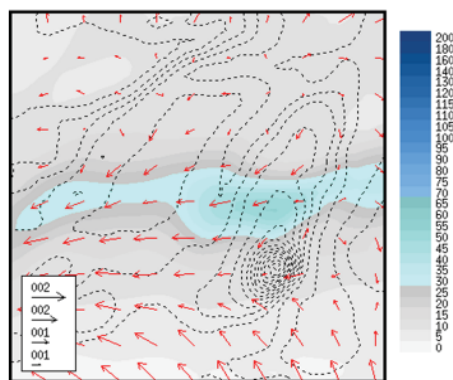
09 :00 HAE 26/08/99



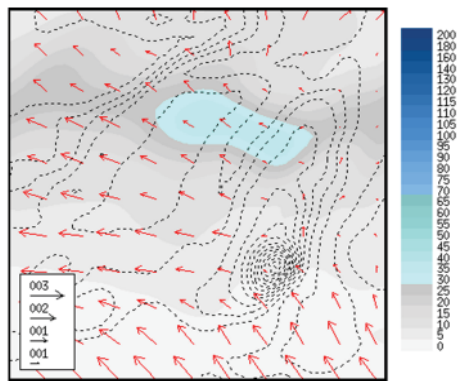
11 :00 HAE 26/08/99



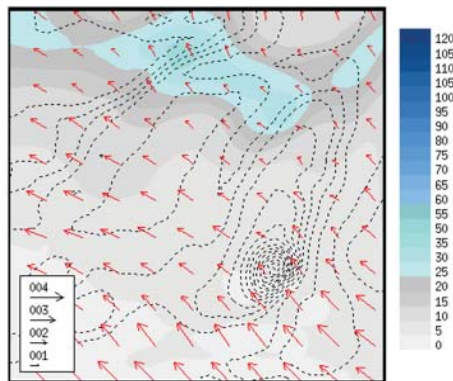
13 :00 HAE 26/08/99



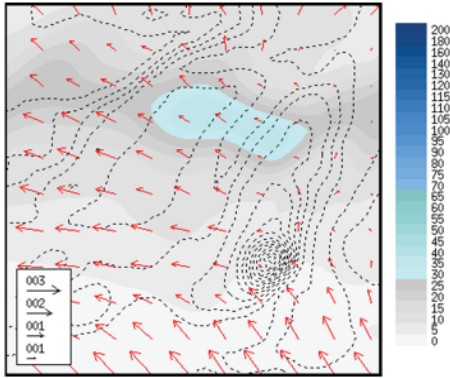
15 :00 HAE 26/08/99



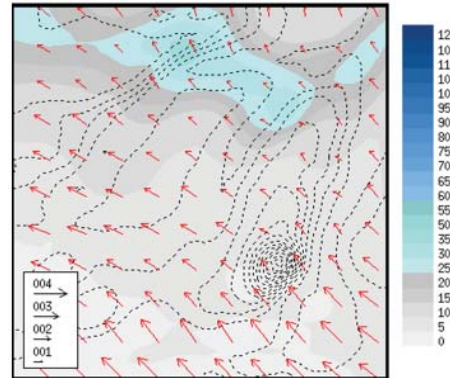
17 :00 HAE 26/08/99



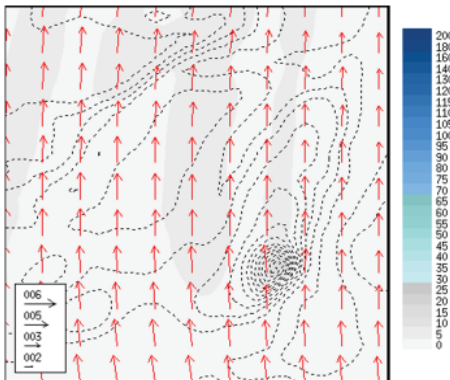
19 :00 HAE 26/08/99



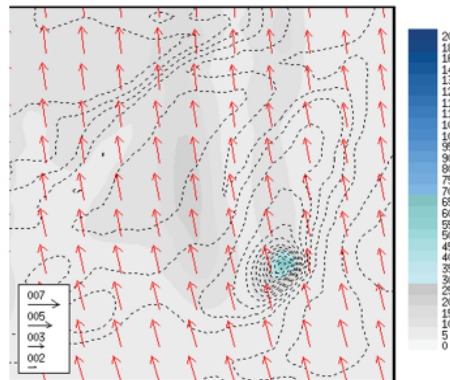
17 :00 HAE 26/08/99



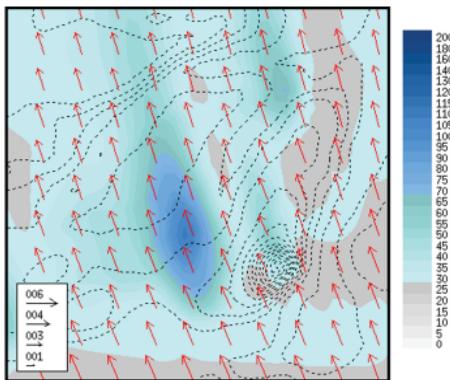
19 :00 HAE 26/08/99



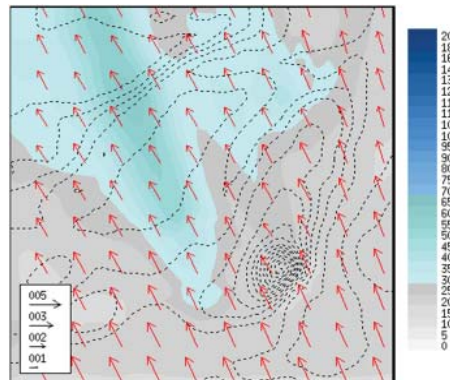
05 :00 HAE 27/08/99



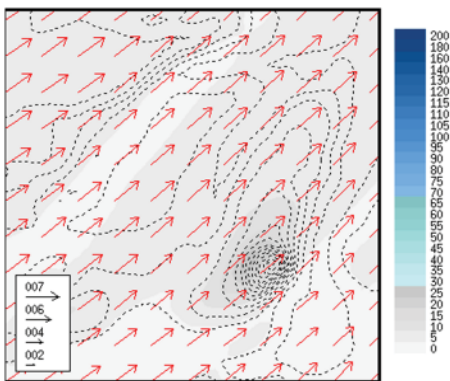
07 :00 HAE 27/08/99



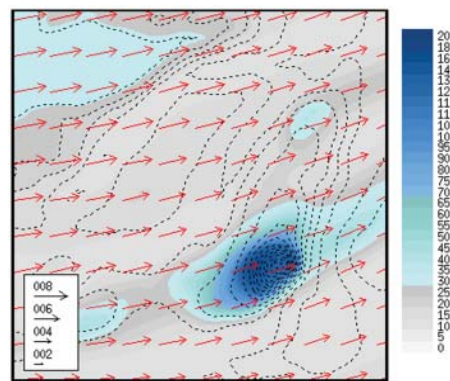
09 :00 HAE 27/08/99



11 :00 HAE 27/08/99

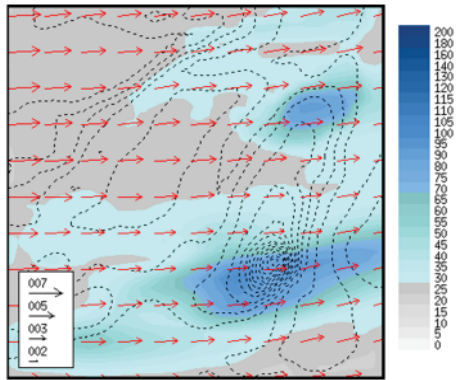


05 :00 HAE 28/08/99

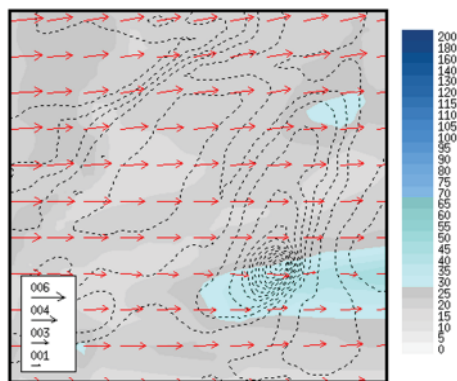


07 :00 HAE 28/08/99

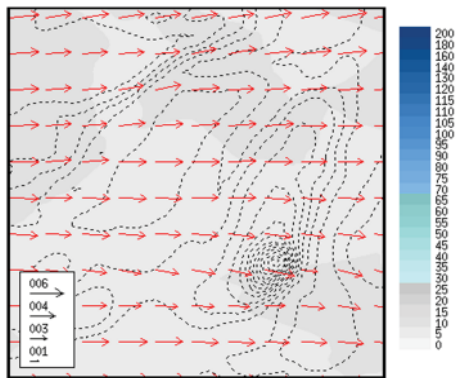




09 :00 HAE 28/08/99



11 :00 HAE 28/08/99



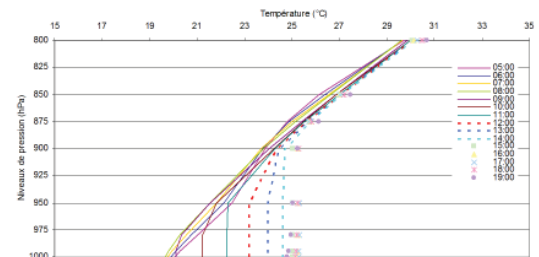
13 :00 HAE 28/08/99

Figure 3.33 : Séquence des 26 au 28/08/99. Illustration du déplacement du nuage de pollens à 1000mb et en fonction du vent

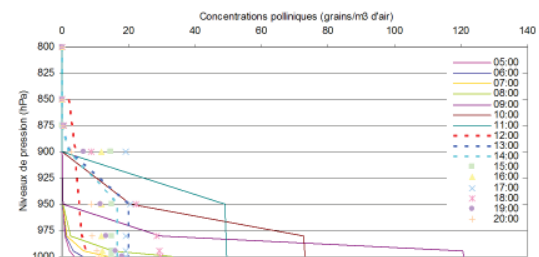
polliniques simulées entre notamment le jour 2 et les deux autres jours simulés. Une séquence d’images proposée à la Figure 3.33, illustre le déplacement du nuage au cours de ces trois jours, en tenant compte également de la vitesse et de la direction du vent. Il est possible de réaliser à quel point, le vent a un effet déterminant dans le parcours suivi par le pollen.

iii. Analyse du pic secondaire dans l’Est le 26/08/99

Un autre point apparaît également intéressant que nous souhaitons aborder et qui se produit au cours du jour 1. Il s’agit de l’apparition d’un pic secondaire significatif de pollen dans l’Est entre 16 :30 et 19 :30 HAE. Ce pollen ne peut être du pollen local, il arrive tardivement. Il a probablement voyagé. La Figure 3.33 illustre parfaitement bien ce qu’il se passe entre 15 :00 et 19 :00 en termes de déplacement du nuage. La Figure 3.34 propose les profils de température potentielle et de concentrations polliniques à la station Est au cours de cette journée.



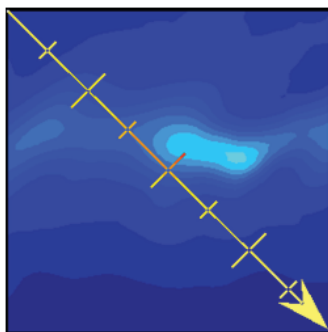
Profils de température potentielle à l’Est



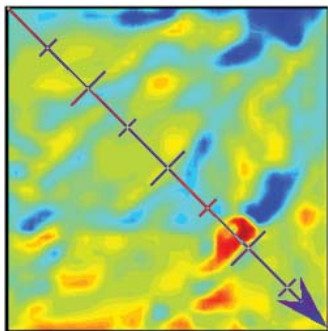
Profils de concentrations polliniques à l’Est

Figure 3.34 : Profils de la température potentielle (haut) et des concentrations polliniques (bas) mesurées à l’Est à l’occasion du jour 1, le 26/08/99

La couche de mélange s’y développe progressivement au cours de la journée. On suit son évolution grâce au profil de la température potentielle. A compter de 18 :00, elle commence à régresser, mais très légèrement. Elle s’étire alors encore jusqu’à 900 mb, soit environ un peu plus de 600 mètres. En ce qui concerne les profils de concentration pollinique, remarquons que les concentrations sont maximum à la surface à 09 :00 puis régressent en accord avec l’augmentation du volume de de la couche de mélange. Ce volume atteint dès 11 :00 persiste ensuite tardivement dans l’après midi. En même temps, il est intéressant de constater que les concentrations diminuent au point d’atteindre des valeurs minimales à midi alors que la couche de mélange s’étire sur près de 1500 mètres de haut puis se mettent à augmenter de nouveau, alors que le sommet de la couche de mélange diminue. Nous savons que la plante n’émet du pollen que le matin. Nous



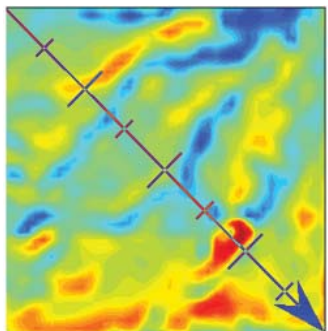
a) 16 :00HAE



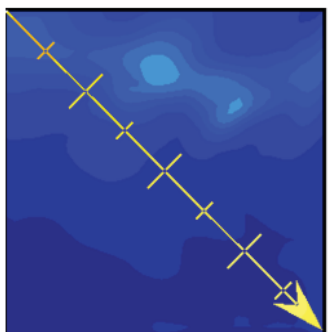
b) 16 :00HAE



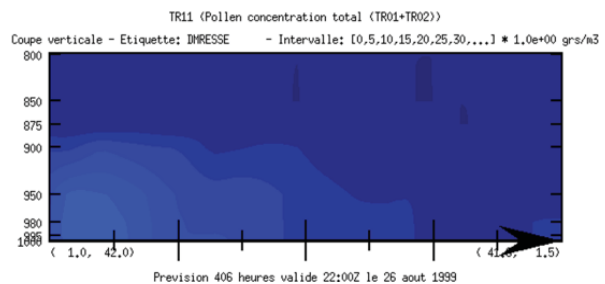
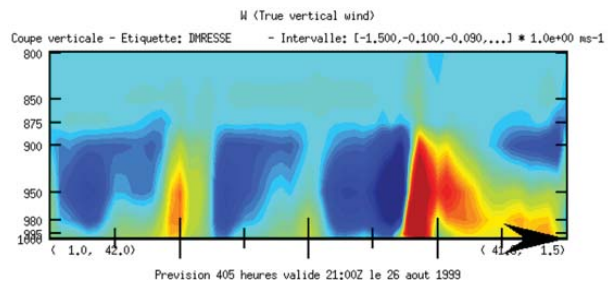
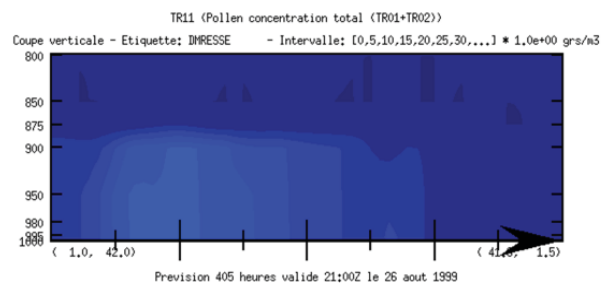
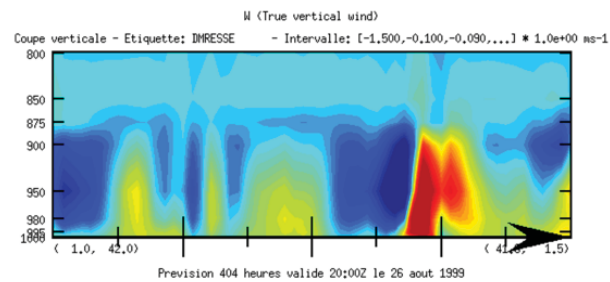
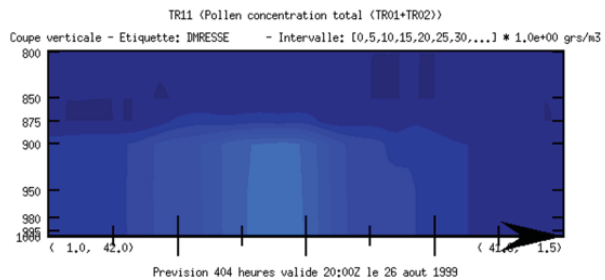
c) 17 :00HAE



d) 17 :00HAE



e) 18 :00HAE



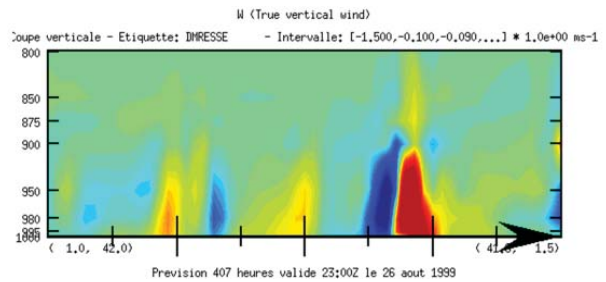
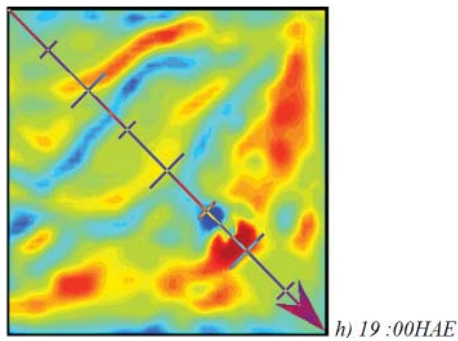
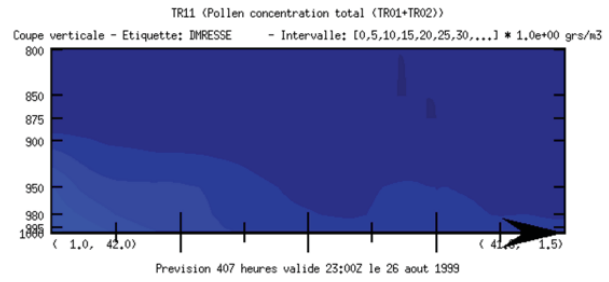
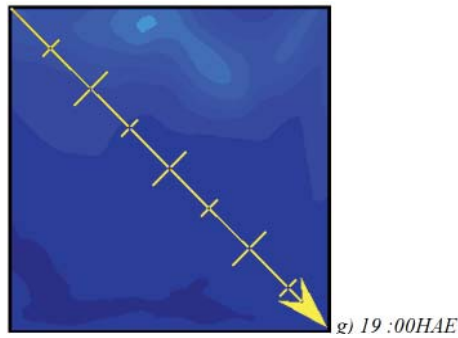
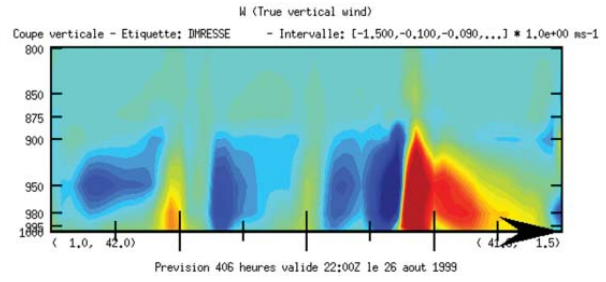
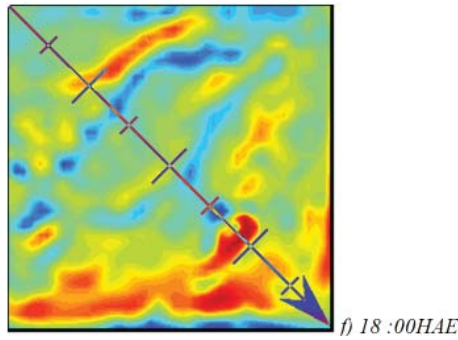


Figure 3.35 : Coupes transversales des concentrations polliniques en grains/m<sup>3</sup> d'air (a, c, e et g) et des mouvements verticaux en cm/s (b, d, f et h) représentés par la variable ppw à l'Est entre 16 :00 et 19 :00 le 26/08/99

rejetons donc la possibilité de production locale tardive et ce d'autant plus que dans le MRCC elle est prescrite à heures fixes. Il s'agit donc bien de pollen qui vient d'ailleurs, transporté par des vagues successives d'air. Remarquons qu'après avoir atteint ce minimum à midi, les concentrations à la surface augmentent de nouveau et de façon substantielle jusqu'à 13 :00, puis diminuent de nouveau, pour atteindre de nouveau un maximum à 18 :00. Cette courbe suit l'allure de celle de la vitesse du vent. A midi, le vent a chuté. Il est probable que des quantités de pollens potentiellement importantes aient été ainsi maintenues dans les basses couches. Une fois que le vent se lève de nouveau, il charrie tout ce pollen en suspension au CV et le transporte selon l'axe dominant du vent. A 19 :00, la couche de mélange est de nouveau pleinement développée sur près de 1000 mètres. La Figure 3.35 présente les coupes verticales de concentrations et

du mouvement vertical au cours des heures de fin d'après midi afin de comprendre ce qu'il se passe.

A 16 heures, les concentrations polliniques forment en quelque sorte « une tour » qui s'élève jusqu'à environ 900 mètres. Si l'on compare cette coupe avec celle du vent vertical, nous remarquons une concordance immédiate et manifeste entre cette zone de concentrations importantes et une zone d'ascendance traduite par la couleur verte. Cette poche de pollen est donc le résultat de mouvements ascendants issus de convection d'origine probablement thermique à cette heure de la journée. Nous pouvons remarquer que jusqu'à 19 heures, l'expansion de ce nuage est rythmée par ces zones d'ascendance ou de subsidence de l'air. Par ailleurs en fin d'après midi, le vent se lève après avoir été très calme en cœur de journée et sa direction est alors du SE. Il arrive donc selon le même

axe que celui suivant lequel ces coupes sont réalisées. Il est ainsi tout à fait possible de voir à 19 heures, ce transport du SE vers le NW. Le pollen est littéralement charrié par la masse d'air.

Remarquons que sur la figure 3.36, les zones en rouge, c'est-à-dire celles où les mouvements verticaux sont positifs donc orientés vers le haut, sont tous localisés sur des zones terrestres à l'inverse des zones en bleu (images de gauche), qui délimitent bien les rivières. Notons aussi sur le champ de 19 :00 un point bleu très marqué sur l'île de Montréal. Il correspond au Mont Royal qui génère par sa présence en tant qu'obstacle au flux, des mouvements de subsidence sous le vent de celui-ci. En effet, le centre ville surchauffé en fin de journée est une véritable « cheminée », une zone d'ascendance très forte (zone rouge-marron). Le flux d'air qui s'élève est rabattu sous le vent du Mont Royal d'autant plus fortement que le vent est désormais fort, ce qui génère cette zone de subsidence sur le flanc NO de la montagne. Dans cette région, on note que le nuage de pollen s'affaisse à moins de 200 mètres d'altitude pour reprendre de l'ampleur un peu plus loin, une fois sorti de cette zone de convergence des flux.

#### iv. Origine des pollens au cours de cette séquence

La Figure 3.37 illustre l'origine des pollens suivant la part qu'ils occupent dans les concentrations totales enregistrées. Ces valeurs apparaissent en %. Chaque site est représenté par un graphique. Remarquons que les trois premiers, concernant l'Ouest, VL et le CV présentent tous trois la même organisation dans le temps. La courbe grise représente dans tous les cas la part du pollen insulaire et la noire celle du pollen extra local sur les concentrations totales simulées. Dans ces trois stations, jusqu'à 06 :00 HAE voire 07 :30 dans le cas de VL, le pollen extérieur est dominant au cours du jour 1.

Le temps du pic de concentration le pollen est essentiellement d'origine insulaire (80% dans le cas de l'Ouest, juste 55% dans celui de VL et plus de 90% dans celui du CV). Au CV, on remarque d'ailleurs encore le décalage dans le temps. Durant le 27/08, le pollen extérieur domine partout avec toutefois un apport de pollen local à l'Ouest au moment du pic. Enfin le troisième jour, à l'Ouest la part de pollen local est beaucoup moins importante que celle du 26/08 laissant entendre que du pollen extérieur à l'île est enregistré rapidement à cette station. A VL en revanche, la part de pollen local est plus grande ce jour là et le pic secondaire est cette fois-ci bien marqué avec une part de pollen insulaire de 50% du total donc non négligeable. Au CV, la situation est assez semblable avec celle du 26/08 pour le pic dominant et ici aussi le pic secondaire est apparent avec 40% de pollen insulaire.

La station Est est plus complexe à analyser. Il s'agit

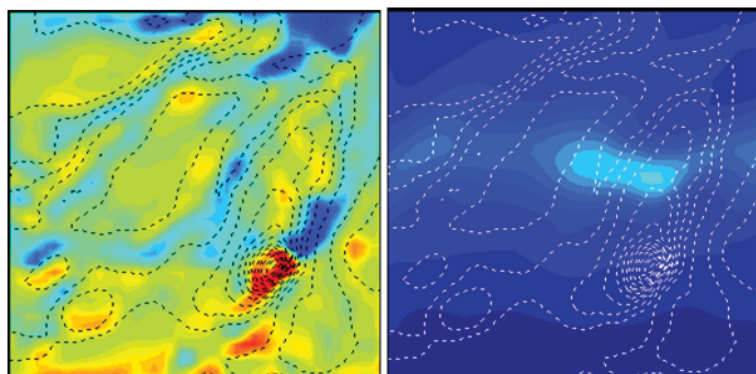
en effet d'un véritable chassé croisé entre la part de pollen local et celle de pollen extra local. La nuit dans tous les cas le pollen extra local domine. Il s'agit de la concentration de fond. Comme les plantes n'émettent pas, cela ne concerne que de très faibles quantités de pollen. Au moment du pic de pollen d'origine local est dominant au cours des trois jours. Entre deux, le pollen extra local reprend toujours le dessus. Mais il se passe quelque chose de vraiment particulier très tôt dans la nuit du 26 au 27/08. En effet, alors que durant ces périodes les concentrations de fond sont généralement extra locales, il y a un pic vers 01 :30 du matin de la part de pollen local sur le total. Il est délicat d'interpréter ce résultat ainsi mais il pourrait être apparenté à un changement dans la direction du vent. Les animations présentées à la figure 3.33 devraient nous le montrer si c'est le cas.

#### v. Analyse des risques associés et remarques conclusives

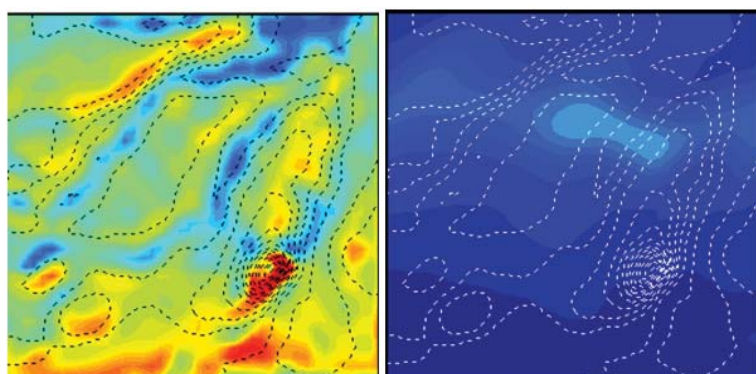
Nous avons conservé une échelle de risque semblable à celle employée par la Ville de Montréal. Ainsi de 0 à 3, les risques sont nuls, puis de 3 à 25, ils sont faibles, de 25 à 100 modérés et au-delà de 100, forts. Nous remarquons dans le cas de la journée du 26/08/99 présentée à la Figure 3.38 que peu importe le moment de la journée, jamais le risque n'est nul sur l'ensemble du territoire étudié. Il en est de même le 28/08 (Figure 3.40) et une petite poche de risque très faible apparaît en revanche tôt le matin le 27/08 (Figure 3.39). Ensuite c'est entre 07 :00 et 10 :00 du matin que la plus grande zone à risque se produit dans le cas des journées des 26 et 28/08. En ce qui concerne la journée du 27/08, il y a un léger décalage d'une heure. Dans le cas de la journée du 26/08, la majeure partie du territoire se trouve sous risque modéré. Une zone centrale de l'île de Montréal semble particulièrement affectée par des risques forts. Le centre ville est notamment concerné par ceci, au moins une partie du temps. Finalement dans le courant de l'après midi, un panache de risque modéré s'étire tel un ruban SE-NO, déplacé par les vents dominants. Dans ce cas de figure, certaines zones du territoire demeurent à risque modéré tardivement en fin d'après midi.

De cette expérience, il faut retenir que l'on ne doit pas uniquement se concentrer sur les heures de la matinée correspondant au maximum d'émission lorsqu'il est question de l'étude du risque associé au pollen de l'ambrosie. Certes ces heures sont déterminantes des quantités totales de pollen émises dans l'air mais elles ne définissent en rien le comportement du nuage par la suite et son évolution spatio-temporelle. Cette dernière est le fait des conditions atmosphériques rencontrées au cours des heures qui suivent l'émission. Selon les cas, des poches de risque relativement élevé peuvent demeurer et nuire à une bonne part de la population

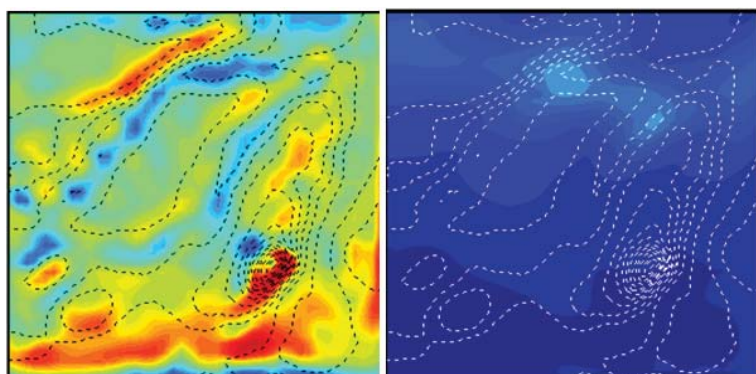




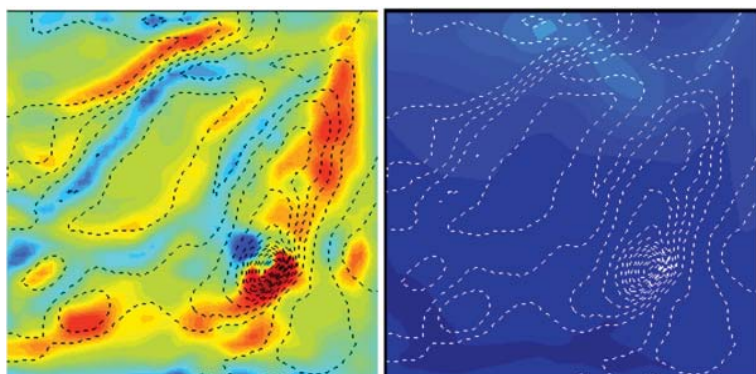
16 :00



17 :00



18 :00



19 :00

Figure 3.36 : Champs des concentrations polliniques en grains/m<sup>3</sup> d'air à droite et des mouvements verticaux en cm/s à gauche entre 16 :00 et 19 :00 le 26/08/99 à l'Est



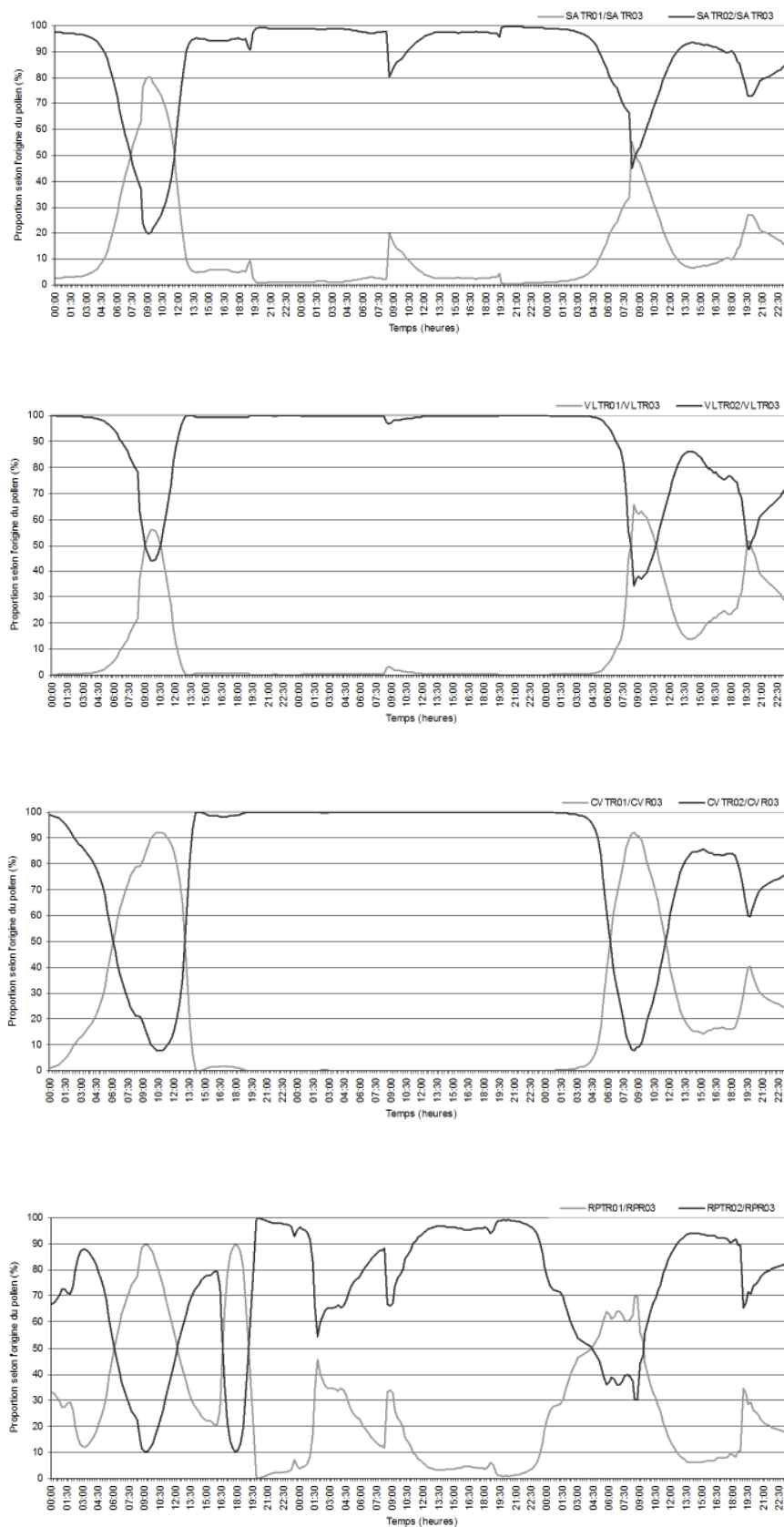


Figure 3.37: Illustration de la part respective de pollen sur la concentration totale mesurée selon qu'ils sont d'origine insulaire (ligne grise) ou extra locale (ligne noire)

même en fin de journée. Il est aussi nécessaire de prendre en compte que le MRCC ne considère pas la totalité de la charge pollinique probable. Il sous estime les quantités. Si nous comparons les trois journées simulées, nous remarquons qu'en dépit de différences dues à des conditions atmosphériques quelque peu différentes d'un jour à l'autre, dans le cas de journées de flux du Sud et de changement de temps, l'ensemble de la région est à un moment donné plongée sous des risques plutôt élevés. Le vent venant du Sud, balaye l'ensemble de la région. La Figure 3.41 présente à type d'exemple l'animation d'une journée de flux du Nord. Nous remarquons que dans ce cas, la région touchée par des comptes élevés est beaucoup plus limitée. Ainsi, toutes les situations météorologiques même si elles sont porteuses de pollens n'ont peut être pas les mêmes implications en terme de distribution spatiale du risque sur le territoire. Suivant les cas de figure, des régions plus ou moins vastes peuvent être affectées plus ou moins durablement. Une analyse plus systématique de ces différentes situations s'impose. Elle fera l'objet d'une publication ultérieure. En attendant, si de telles illustrations du risque sont possibles avec le modèle tel qu'il est configuré, on peut aisément préfigurer du caractère alarmant de la situation réelle.

Globalement, le MRCC-Pollen fournit des résultats tout à fait intéressants. Certains développements et améliorations peuvent encore lui être apportés en vue d'améliorer, entre autre chose, la précision des comptes polliniques simulés mais déjà maintenant, il s'agit d'un outil novateur et fort appréciable pour visualiser et étudier de comportement du nuage de pollen d'ambrosie. L'ambrosie a été désignée pour cette phase exploratoire de simulation du pollen parce que d'une part son pollen est facilement reconnaissable, ce qui limite les risques d'erreurs lors du comptage des captures donc nous assure d'une relative fiabilité des comptes polliniques obtenus et ensuite parce qu'il s'agit d'un pollen très bien documenté dont on connaît bien les caractéristiques. Il est évident que tout autre pollen pourrait être considéré de la même manière mais il faudrait alors adapter les paramètres de la simulation.

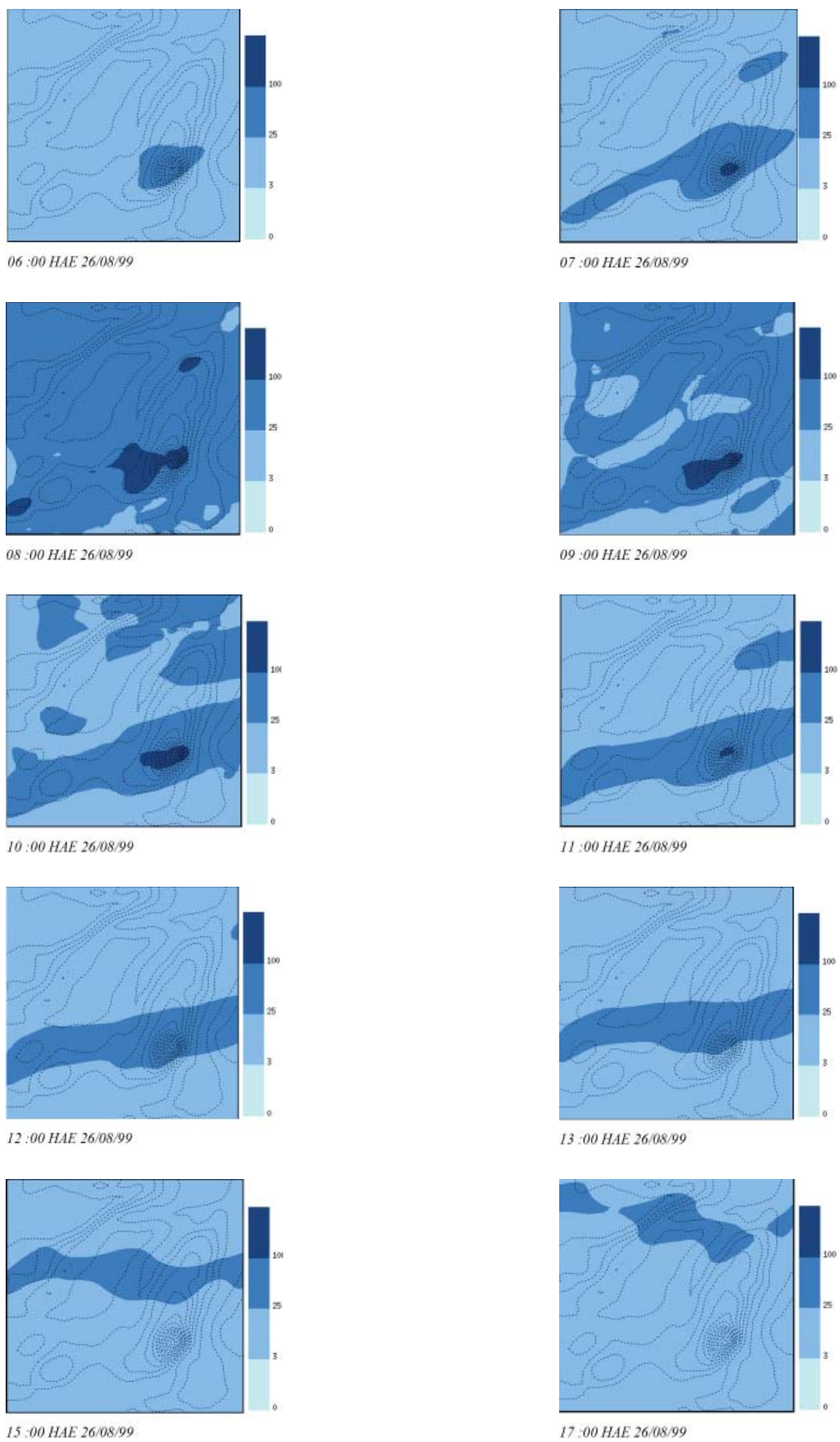
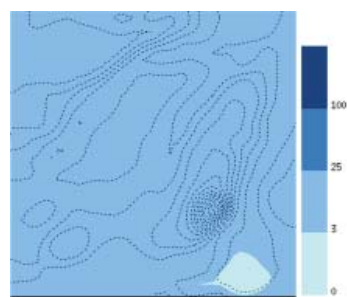
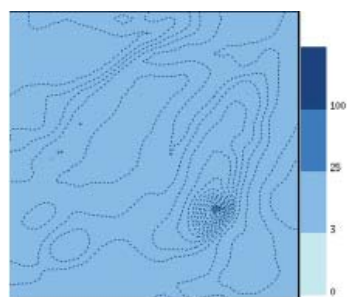


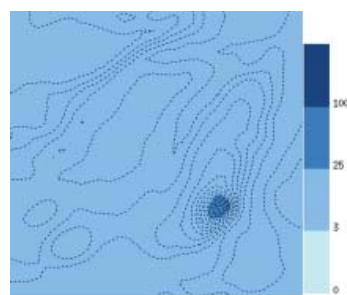
Figure 3.38 : Tentative de visualisation du déplacement du risque dans la région à l'étude au cours de la journée du 26/08/99



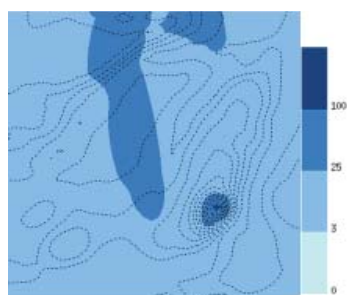
05 :00 HAE 27/08/99



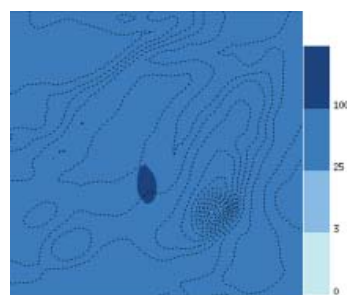
06 :00 HAE 27/08/99



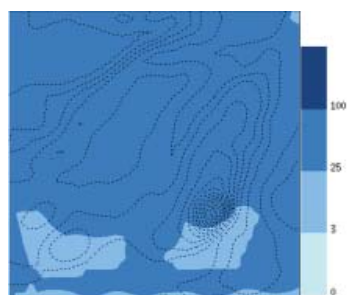
07 :00 HAE 27/08/99



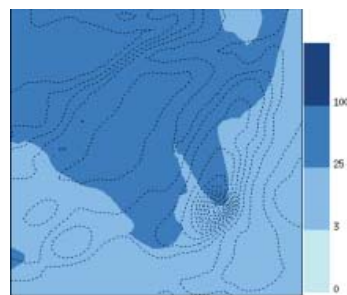
08 :00 HAE 27/08/99



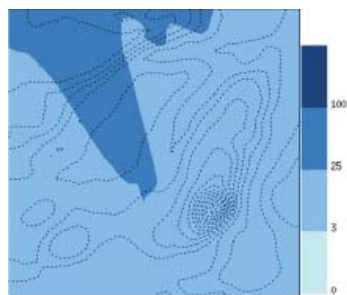
09 :00 HAE 27/08/99



10 :00 HAE 27/08/99



11 :00 HAE 27/08/99



12 :00 HAE 27/08/99

Figure 3.39 : Tentative de visualisation du déplacement du risque dans la région à l'étude au cours de la journée du 27/08/99

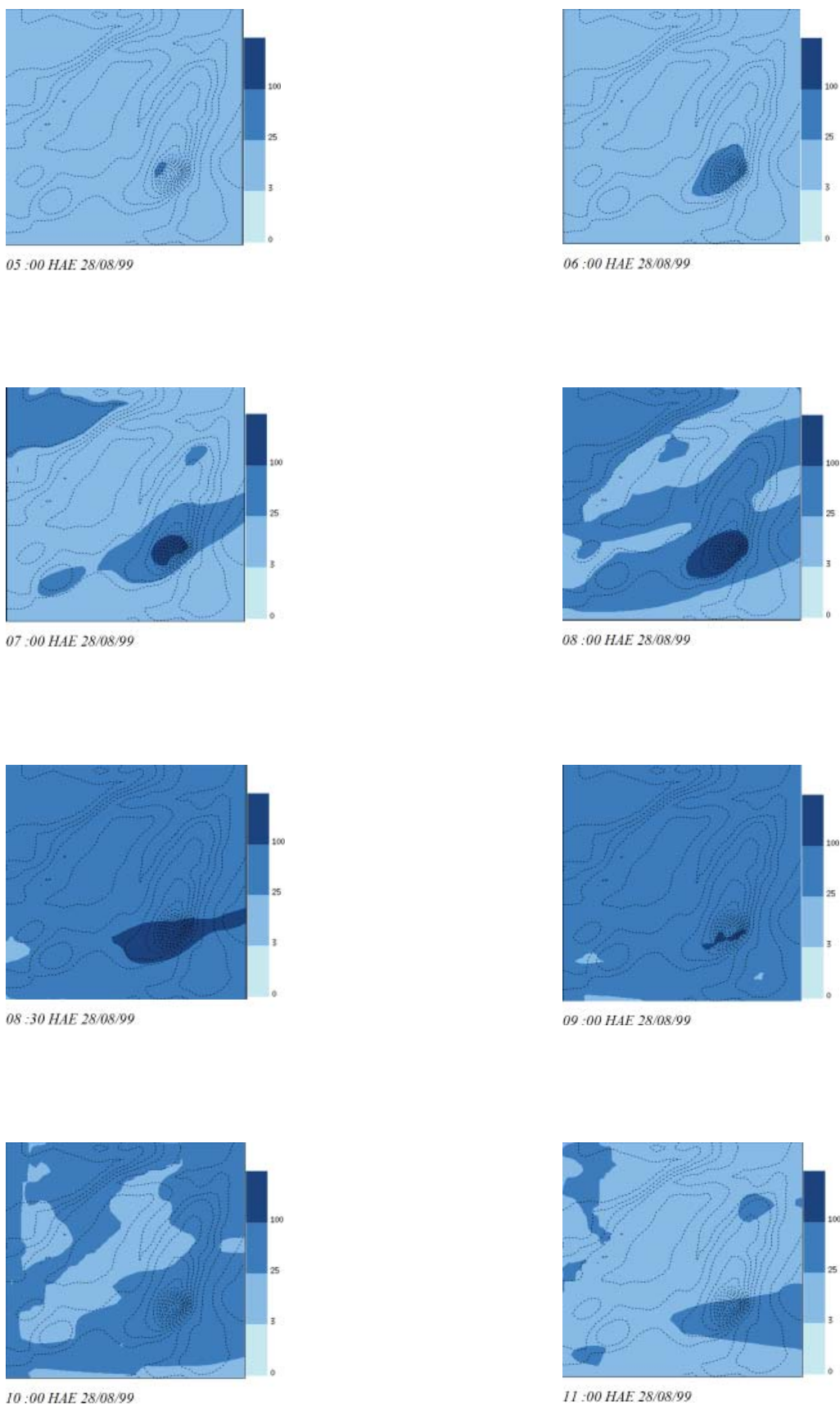


Figure 3.40 : Tentative de visualisation du déplacement du risque dans la région à l'étude au cours de la journée du 28/08/99



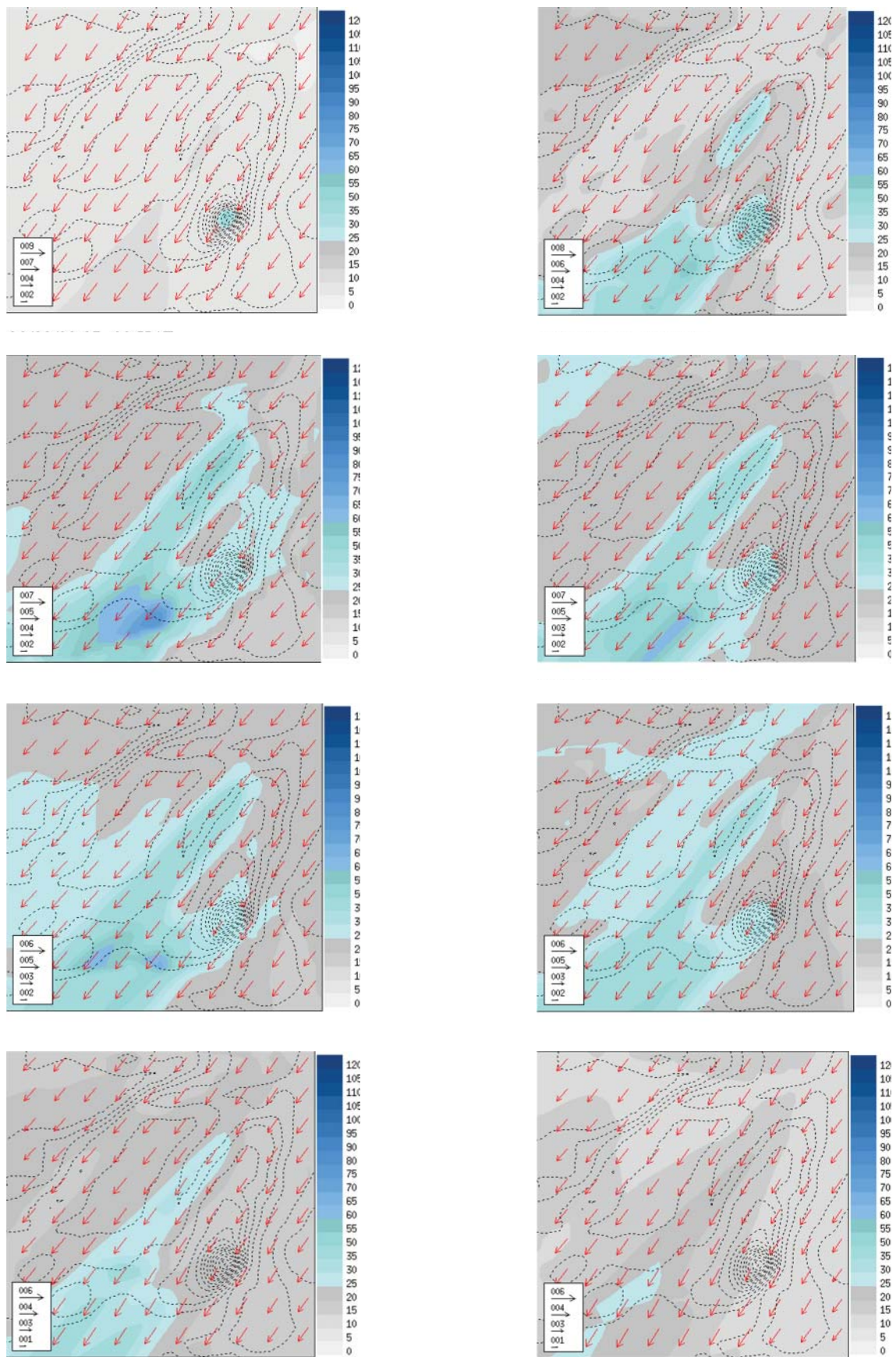


Figure 3.41 : Animation d'une situation du Nord (TT5) le 23/08/2002

## CONCLUSION

---

Cette recherche nous a amené à étudier le comportement du nuage de pollen de l'ambroisie émis en fin d'été dans la Grande Région de Montréal. Il nous importait dans un premier temps, sur la base d'observations, de déterminer s'il existait une ou des conditions particulièrement propices à une augmentation du risque d'allergie à ce pollen dans la Grande Région de Montréal au jour le jour, au cours d'une saison pollinique. L'ambroisie à feuilles d'armoise, plante sous haute surveillance, est en effet à la source de très nombreux cas d'allergies respiratoires partout où elle se développe et s'installe. De ce fait et au regard de ses méfaits sur la santé, l'objectif indirect de cette recherche était de se demander si nous pouvions trouver un quelconque moyen d'arriver à prévoir ces épisodes de risque fort sur la base de considérations météorologiques d'échelle régionale, les types de temps. Dans une seconde étape, il nous intéressait d'analyser certaines de ces situations météorologiques propices à de telles situations à risque à l'aide d'un outil numérique perfectionné le MRCC. L'utilisation de ce modèle avait pour objectif de nous permettre d'approfondir la connaissance du comportement du nuage à beaucoup plus fine échelle. Préalablement à ces deux étapes qui correspondent l'une et l'autre respectivement aux chapitres 2 et 3, le chapitre 1 se consacre au recensement de la littérature traitant du cas de l'ambroisie, du point de vue de la plante certes mais plus particulièrement de celui de son pollen.

L'ambroisie fait l'objet depuis longtemps déjà d'une littérature abondamment fournie à son propos. Nous avons tenté d'en faire un survol le plus complet possible. Il est ainsi reconnu qu'elle présente des rythmes polliniques diurnes spécifiques dont dépend sa contribution au nuage pollinique de fin d'été. Pollen dominant de la spora pollinique des mois d'août et septembre, il contribue très largement aux allergies de cette période de l'année, affectant plus de 10 à 15% de la population locale. Le Québec est la Province canadienne la plus sévèrement touchée par les effets de la plante. Les coûts pour la santé de même que l'ensemble des coûts économiques associés tels que ceux issus de l'absentéisme au travail, représentent un manque à gagner croissant d'année en année. Plus de 230 millions de dollars canadiens sont, à titre d'exemple, dépensés chaque année pour le simple achat d'antihistaminiques. La situation est donc grave et méritait que l'on se penche une nouvelle fois sur cette

question.

Outre les aspects relatifs au pollen, la plante elle-même suscite beaucoup d'intérêt du fait qu'elle compte parmi les espèces végétales qui étendent sans cesse leur aire de distribution. Elle fait partie en Europe des plantes envahissantes. On la retrouve d'ailleurs en quantités appréciables dans bon nombre de pays d'Europe où ses effets commencent à se faire vraiment ressentir. La Suisse ne sera pas épargnée par ce fléau si des mesures ne sont pas prises rapidement. En effet, même si à l'heure actuelle, la présence de la plante demeure marginale ainsi que les comptes polliniques mesurés, il y a fort à craindre que la région genevoise, pour ne citer qu'elle, soit propice à son installation en partie au moins du fait de sa localisation dans l'axe de la vallée rhodanienne qui, en France, compte déjà de bien nombreux foyers d'infestation. Les comptes polliniques mesurés à Lyon sont aujourd'hui suffisamment importants pour que la plante soit pointée du doigt par les services de santé et autres services de l'environnement. Cette thèse réalisée à l'Université de Fribourg mais portant sur la région Montréalaise pour des raisons de collaboration avec l'équipe du Professeur Blanchet de l'UQAM et de la disponibilité de l'information (bases de données), n'en demeure pas moins ouverte et adaptable à d'autres lieux. Il s'agit là d'un point fort de la méthode adoptée et présentée. En effet, l'expérience réalisée au-dessus de la région de Montréal à l'aide du MRCC est tout à fait transposable ailleurs sur le globe, le tout étant de disposer des paramètres indispensables à la simulation pollen. Il était seulement plus aisé d'étudier la plante dans un contexte où elle est pleinement disponible et où le pollen est échantillonné et comptabilisé depuis des années. En effet, les bases de données sont nombreuses et assurent de cette façon d'une relative homogénéité des échantillons disponibles. C'est ainsi qu'avec le concours de la Ville de Montréal et du Département de Géographie de l'UQAM, il a été possible de nous procurer 10 années de mesures dans la région montréalaise.

La revue de la littérature produite dans le premier chapitre, nous a donc conduit à aborder les questions relatives à la trajectoire aérobiologique du pollen de l'ambroisie et du milieu au sein duquel elle a lieu. Le pollen est en effet émis dans l'atmosphère, si bien que toute la phase centrale de sa trajectoire se déroule dans

ce milieu et est totalement dépendante des conditions de celui-ci. C'est pourquoi une attention particulière a été apportée à la description de la couche limite atmosphérique et des paramètres météorologiques intervenant au cours des différentes étapes du transport du pollen. Cette région de l'atmosphère en contact direct avec la surface est directement influencée par celle-ci tant du point de vue thermique (échanges radiatifs) que turbulent (échanges mécaniques) et ses caractéristiques ont des effets quasi immédiats sur le devenir aérien de la charge pollinique (durée du transport, élévation, distance parcourue, élimination). Lors de l'émission, les variables qui favorisent la prise en charge du pollen par l'air sont toutes relatives à la désintégration de l'inversion thermique nocturne, soit une baisse de l'humidité relative corrélée à une augmentation marquée de la température et de la vitesse du vent. En effet, de l'air plus sec accélère l'évaporation de l'humidité des anthères favorisant ainsi la libération du pollen par l'éclatement des sacs polliniques et la turbulence entraîne sa prise en charge par l'air. Le pic d'émission a toujours lieu en courant de matinée. Une fois que celle-ci a commencé, à moins que le vent ne tombe complètement ou que les précipitations n'interviennent, elle a lieu jusqu'à la fin. Parmi les paramètres les plus déterminants de cette prise en charge aérienne et du transport qui s'en suit, la température est sans conteste l'un d'entre eux. Associée à de bonnes conditions de vent et d'humidité adéquates, elle favorise la pollinisation. Parmi ces conditions, l'état général de la stabilité atmosphérique est déterminant. Une fois transporté, le pollen rencontre des conditions qui, soit permettent son maintien dans l'air, soit favorisent son élimination plus ou moins rapide. Parmi l'ensemble des pollens émis, 80% d'entre eux se déposent à moins de 500 mètres de la source et moins de 20% au cours des 10 premiers km de celle-ci. C'est dire que relativement peu de pollens voyagent effectivement sur de très longues distances. La déposition du pollen se fait alors soit par impaction, soit par sédimentation sous l'effet de la gravité. Tant que le pollen se trouve dans la couche de mélange qui caractérise la couche limite atmosphérique bien mélangée et turbulente, il a des chances de voir son transport se prolonger, à moins qu'il ne rencontre quelque obstacle (bâtiments, feuillages) ou soit lessivé sous l'effet de précipitations. Dès lors qu'il quitte cette couche et se retrouve dans la couche laminaire de surface caractérisée par la diffusion et non plus la turbulence, il n'a alors plus tellement de chance d'être remis en suspension dans l'air et est donc la plupart du temps condamné à se déposer. Il peut toutefois arriver que des coups de vents plus violents entraînent un re-soulèvement d'une partie des pollens ainsi éliminés.

L'étude de l'ensemble des processus et rythmes qui caractérisent et interviennent au cours de la trajectoire du pollen de l'ambrosie suscite depuis longtemps beaucoup d'intérêt parmi les différents milieux de la recherche. De

nombreuses tentatives ont déjà eu lieu en vue de parvenir à prévoir le comportement de la plante et envisager les quantités de pollen émises durant la saison à venir. Pour cela différentes approches ont vu le jour, des statistiques classiques aux méthodes déterministes plus complexes et faisant surtout intervenir des outils de plus en plus sophistiqués. La plupart d'entre eux ont initialement comme objectif de simuler les conditions atmosphériques avec la plus grande précision possible. C'est le cas du MRCC qui a été employé au cours de cette recherche. Sa capacité reconnue à simuler le climat avec une très fine résolution spatiale, a suscité un intérêt pour tenter une simulation du comportement du nuage de pollen. Il n'a en aucune façon été modifié par rapport à sa version originale mais s'est vu ajouter un certain nombre de modules qui lui ont permis d'intégrer les aspects touchant au pollen.

Le second chapitre présente des analyses tout à fait classiques des données polliniques et météorologiques à partir de statistiques non paramétriques délibérément choisies pour la facilité d'interprétation des résultats qui leur revient, du fait qu'elles n'exigent pas de transformation des échantillons. Dans un premier temps, l'étude des saisons polliniques, nous a amené à isoler des disparités mais aussi des similitudes de comportement des stations de mesure entre elles, de même que des années entre elles. Certains sites de mesure sont toujours plus polliniques que d'autres. Il s'agit, peu importe la saison considérée mais 2002 mise à part, des stations Sainte Anne de Bellevue et Rivière des Prairies – Pointe aux Trembles, localisées aux extrémités respectivement occidentale et orientale de l'île. Toutes deux présentent à ce propos un point en commun : la proximité de sources non négligeables de pollen. En termes de tendances saisonnières, il semble que les stations de la moitié occidentale de l'île semblent voir ses conditions polliniques se détériorer avec le temps alors que la moitié plus orientale détecte plutôt une tendance vers une amélioration relative. Ces observations sont d'autant plus visibles lorsque les concentrations sont traitées non plus sous la forme de comptes polliniques mais de niveaux de risques d'allergie. Dans ce cas, les risques majeurs augmentent à l'Ouest alors qu'ils stagnent voire baissent dans l'Est au profit de risques plus faibles. Par ailleurs, durant la période 1994-2003 étudiée, 5 années furent particulièrement polliniques. Il s'agit des années 1997 à 2001. 1997 et 1998 sont des années d'envergure semblable et de courbes polliniques saisonnières assez similaires à la différence près qu'en 1997, la station de l'Est est la plus pollinique alors qu'en 1998, il s'agit de celle de l'Ouest. Suivent ensuite les 3 années les plus polliniques avec notamment des concentrations mesurées dans l'Ouest absolument gigantesques, avec à titre d'exemple en 2000, près de 10000 grains pour l'ensemble de la saison, alors que les autres sites se situent entre 2000 et 4500 grains par année. 1999 apparaît comme ayant connu une longue



saison pollinique marquée par une fin tardive mais aussi comme ayant été la plus « normale » en terme d'allure de sa courbe pollinique même si les quantités étaient particulièrement élevées. L'année 2000 ne se distingue pas tant de la précédente mis à part que le pic principal a eu lieu plus rapidement. 2001 quant à elle a connu un début de saison assez brutal puis a été marquée par une succession inhabituelle de pics d'envergure moindre pour aboutir à la mi-septembre à un pic principal qui marque brutalement la fin de la saison. D'un point de vue pollinique cette année fut donc plutôt atypique.

L'étude des conditions météorologiques expérimentées à Montréal qui a suivi, nous a amené à établir des liens avec les situations polliniques précédentes. Il apparaît ainsi très clairement qu'à partir de l'année 1997, première année fortement pollinique, il y a eu une augmentation manifeste de la fréquence des périodes estivales sèches. Par ailleurs, les concentrations des années les plus polliniques 1998-2001 sont toutes associées aux printemps et étés les plus chauds de la décennie. L'année 2000 se distingue cependant des autres avec un printemps et un été plutôt humides mais en revanche comme les autres un printemps très chaud. En revanche en 1999 et 2001, le déficit hydrique connu semble avoir été à l'avantage de concentrations totales un peu plus élevées. Nous avons donc pu retenir que les années dont les printemps et les étés présentaient une tendance plutôt chaude et sèche et plus spécifiquement des printemps chauds et des étés secs, semblaient être plus favorables à des comptes polliniques élevés, donc aussi à un accroissement du degré de risque associé.

Afin d'arriver à une analyse un peu plus systématique, une approche par type de temps a ensuite été proposée. La classification choisie (SSC de Sheridan, 2002) compte 7 types de temps spécifiques dont un de transition correspondant à un changement radical de masse d'air. Nous avons pu noter une occurrence plus importante de 4 d'entre eux à savoir tempéré sec, tropical humide, tempéré humide et temps de transition durant la période d'intérêt. Afin de lier ces types de temps aux risques polliniques associés, le poids pollinique respectif de chacune de ces conditions sur la charge pollinique saisonnière globale a été déterminé. Il a ainsi été mis en évidence que dans certains cas, la fréquence d'occurrence est déterminante comme dans le cas des journées tempérées sèches ou tropicales humides mais que dans d'autres, c'est bien le type de temps lui-même qui est fortement déterminant. C'est le cas principalement du type tropical sec qui en dépit de sa rareté est très fortement à risque lorsqu'il a lieu. Il aurait été appréciable de pouvoir identifier un ou des coupables ! Mais cela ne s'est pas avéré si simple. Il n'existe pas en effet de type de temps plus « à risque » qu'un autre ! Certains d'entre eux semblent générer des conditions propices à l'augmentation des risques du fait de l'essence même de ce qu'ils sont. C'est le cas des deux

types tropicaux et du type de transition. D'autres offrent des conditions favorables à ces situations, lorsqu'ils se dégradent. Il s'agit notamment des cas tempérés, notamment du type tempéré sec qui est aussi le type de temps le plus représenté pendant une saison pollinique. Globalement, il n'est pas possible d'identifier des associations de niveaux de risque à des types de temps spécifiques. En revanche, l'analyse du comportement des paramètres météorologiques qui les caractérisent, fournit un certain nombre d'informations quant à des associations possibles (Figure 2.63). Il a été possible, à cet égard, de mettre en relation, charge pollinique, fréquence d'occurrence du type de temps et paramètres météorologiques les plus cruciaux. Il en est ressorti que les 4 types de temps les plus fréquents sont aussi les plus à risque lorsqu'ils sont associés à une forte baisse de la pression atmosphérique, une augmentation relative de la température de l'air ainsi que de la vitesse du vent. Ces situations correspondent toujours à un renforcement des vents de composante essentiellement occidentale. Dans le cas des trois autres types de temps, plus occasionnels, les risques associés augmentent lorsque la pression atmosphérique s'élève, que la température tend à baisser et que la vitesse du vent s'affaiblit également. Dans ces cas là, le vent est plutôt de composante orientale.

Nous retenons donc qu'au cours de la saison de pollinisation de l'ambroisie à Montréal, les conditions les plus fréquentes et les plus risquées en terme d'allergie au sein de la population locale sont associées au passage de fronts chauds, soit juste à l'avant de ce dernier lorsque les conditions du type de temps tempéré sec habituellement plutôt de nature anticyclonique se dégradent et annoncent un type de temps tropical humide voire de transition ; soit pendant le passage du front avec un maximum atteint au moment du creux barométrique ; soit encore après le front, s'il n'a pas été suivi de précipitations trop importantes. On peut alors se trouver dans un épisode de type tempéré humide qui, suivant les cas, peut être plus ou moins léthargique et avoir pour effet d'emprisonner et retenir à proximité de la surface des quantités importantes de pollens qui peuvent être d'origine lointaine si ce temps succède par exemple à un type tropical humide qui a balayé sur son passage des pollens provenant de plus au Sud. Cette situation de très forte stabilité est assortie d'une forte inversion thermique de basse altitude qui empêche tout échappement de pollen en altitude. Ce type de situation est souvent associé à un épisode de smog, ce qui le rend d'autant plus dangereux puisque comme nous l'avons précisé, la pollution atmosphérique confère au pollen un caractère irritant et accentue sa toxicité. Dans ce cas, ce n'est peut être pas tant la charge pollinique elle-même qui est problématique mais bien les effets de synergie avec la pollution atmosphérique ambiante.

La seconde série de situations correspond plutôt au renforcement d'une situation anticyclonique. Le pollen

est dans ce cas d'origine beaucoup plus locale et les conditions sont plus favorables à sa dispersion. Ces situations de type polaire sont occasionnelles à Montréal pendant l'été comme les cas de situations tropicales sèches particulièrement risquées lorsqu'elles se produisent. Dans tous les cas, ce sont des situations beaucoup moins turbulentes que les précédentes.

Enfin, il a pu être montré en plus de la persistance des types de temps, une relativement bonne persistance des niveaux de risque. Ainsi une journée de risque modéré à fort est précédée dans 85% des cas d'une journée de même niveau de risque, laissant entendre que ce type de journée n'arrive généralement pas seule. Un épisode fortement pollinique a bien des « chances » de durer quelques jours, rendant ainsi les conditions de vie des allergiques plus difficiles, à moins que la pluie ne vienne interrompre ce schéma.

Ces analyses complétées, le chapitre 3 se consacre à la présentation et à l'utilisation de cet outil novateur qu'est le MRCC-Pollen. Ses potentialités sont testées. L'objectif était de parvenir à reproduire le plus fidèlement possible ce qui était observé dans la réalité. L'émission du pollen est prescrite dans le modèle. Cette première étape de la trajectoire simulée est tout à fait en accord avec les références citées dans le chapitre 2. Le modèle reproduit avec une bonne fiabilité les rythmes de l'émission. La question est plus délicate en ce qui concerne les quantités. Au fond, elles sont sous estimées dans le modèle mais les tendances suivent tout de même relativement bien l'observation à part dans certaines circonstances. Disons que dans l'état actuel des choses, le modèle fournit une approximation acceptable des conditions polliniques. En effet deux raisons expliquent ceci. La première concerne la détermination et la localisation des sources d'émission. Sans cartographie de celles-ci, il demeure bien difficile pour l'instant de localiser des sources réalistes d'ambrosie dans le modèle. C'est pourquoi il a été choisi d'une part de nous appuyer sur un inventaire réalisé en 1991 par Collins sur l'île de Montréal, qui bien qu'ancien est vraisemblablement toujours d'actualité. D'autre part, les sites à l'extérieur de l'île n'ayant pas été considérés par l'auteur, il a fallu tenir compte du type d'occupation des sols pour définir une valeur relative potentielle des sources. Enfin, outre cette question des sources dans la simulation de plus fine résolution, il faut également constater la nécessité de disposer d'une cartographie des sources aux plus grandes échelles également soit l'échelle intermédiaire et celle du continent. Dans le cas des simulations réalisées jusqu'à maintenant, le pollen n'entre en jeu qu'au cours de la dernière étape de la simulation, soit à 1 km du fait que ce type d'information est manquant. Il va de soit que ceci a une influence sur les comptes polliniques globaux étant donné que comme nous avons pu le voir dans le chapitre 2, la région de Montréal est largement sous l'influence des vents du Sud

et de l'Ouest, potentiellement chargés en pollens extra locaux voire extra frontaliers. Cette charge pollinique d'origine extérieure n'est donc pas considérée à l'heure actuelle dans le modèle. Tant que cette détermination des sources ne sera pas plus efficace, aucune prévision valable ne pourra être envisagée. Allant dans ce sens un projet est en cours à l'UQAM qui vise à introduire du pollen d'une échelle de simulation plus grande vers une autre plus fine (Blanchet, *com. perso.*, 2005). L'objectif est de permettre au pollen extérieur de pénétrer dans la fenêtre de plus fine résolution spatiale.

Cette question de la non prise en charge actuelle du pollen extra local a évidemment des implications sur les comptes polliniques simulés. Il est possible de localiser sur la grille du modèle les points correspondants aux stations de mesure sur le terrain, ce qui offre l'opportunité de comparer directement valeurs observées et valeurs simulées. Nous avons pu remarquer que si selon l'observation le site occidental est le site le plus pollinique, dans le modèle ce n'est pas le cas du tout. Celui de l'extrémité Est de l'île est plus pollinique, notamment dans le cas de situations telles que celle présentée dans le chapitre 3, soit de flux du Sud. Nous émettons l'hypothèse que vue l'orientation dominante du vent, cette station Est située à l'extrémité Nord Est de la fenêtre absorbe le pollen provenant de sources locales mais aussi celui qui provient de sources plus éloignées de l'Ouest de l'île par exemple et que le tout alourdit la charge de la station. Dans la réalité ce processus doit effectivement avoir lieu mais ce qui distingue alors le site occidental est qu'il est aussi soumis à l'influence de vents provenant de plus au Sud, chose dont il est absolument privé dans le modèle, si bien que les comptes polliniques y sont complètement sous estimés. Il s'agit là d'une des limites actuelles des simulations telles que réalisées.

Toujours concernant les quantités de pollen, nous avons relevé que le schéma d'émission prescrit ne varie pas de jour en jour. Or nous ne sommes pas sans savoir et nous avons d'ailleurs pu l'observer au cours de la décennie étudiée, que les quantités émises, varient de jour en jour, d'année en année et de place en place. Nous savons que les comptes au jour le jour sont fortement corrélés à la température moyenne des deux jours antérieurs (Comtois et Sherknies, 1991 ; Raynor et Hayes, 1970). Dans le modèle chaque point de grille a un schéma d'émission relatif à la présence ou non de plants d'ambrosie et d'une estimation de la densité de ceux-ci. Dans la réalité, ces critères sont effectifs mais d'autres entrent également en compte que le modèle ne peut à l'heure actuelle encore intégrer. En effet, les conditions du printemps déterminent la quantité de plants disponibles pendant l'été de même que leur productivité pollinique. Des conditions défavorables peuvent à la fois faire varier les quantités mais aussi la séquence d'émission soit en favorisant une période d'émission plus hâtive ou plus tardive selon les



cas. Nous avons affirmé en nous appuyant sur la littérature (Comtois, 1992) que le début de la saison de l'ambrosie est déterminé par le dépassement d'un seuil obtenu par la sommation annuelle des degrés jours de croissance au-delà de 5°C et que par ailleurs, ce sont les températures et précipitations du printemps qui déterminent la somme pollinique annuelle (Comtois et Sherknies, 1989). Il serait intéressant d'intégrer ce paramètre dans le modèle de manière à induire la date de démarrage de la saison.

Pour ce qui est de la productivité pollinique et des rythmes de la saison, l'initiation d'un couplage avec un modèle phénologique en amont pourrait être envisagée. La saison de pollinisation de l'ambrosie dure 5 à 6 semaines dans la réalité et ceci pour deux raisons. La première correspond à la germination des plantules au printemps qui s'échelonne sur plusieurs semaines également. Les plus tardives rattrapent en partie leur retard mais il demeure un certain décalage. La seconde est que la floraison de cette plante s'échelonne aussi selon un modèle hiérarchique cyclique (Comtois *et al.*, 1995). L'inflorescence apicale fleurit en premier, puis ce sont les inflorescences du premier embranchement puis du second et ainsi de suite. Cette organisation explique la présence observée de cycles de 5 jours (Comtois *et al.*, 1991) voire 6 jours (Farnham *et al.*, 1989). Il existe par ailleurs une forte auto corrélation temporelle avec l'émission pollinique (Comtois, 1995). Ces critères ne sont pas actuellement considérés dans le modèle. C'est ainsi qu'afin d'accroître la capacité du modèle à reproduire la réalité avec une plus grande précision, il faudrait trouver le moyen d'y intégrer les informations nécessaires au démarrage de la saison, à la prise en compte de la variabilité inter annuelle des quantités mesurées ainsi qu'à la prise en charge du pollen provenant d'ailleurs. La région de Montréal étant une région au relief peu accentué, on peut sans trop de peine imaginer l'existence de ce transport de plus ou moins longue distance. Comme nous venons de le montrer le MRCC-Pollen présente en tant que tel encore de nombreux points de développements futurs possibles. Il n'en demeure pas moins que cet outil offre déjà tel qu'il se présente, un certain nombre d'atouts pour l'analyse détaillée du comportement du nuage de pollen.

Si à l'heure actuelle nous avons pour unique intention de faire une analyse purement quantitative des mesures de pollen simulées et ceci en vue de faire de la prévision de risques polliniques par exemple, alors ces différents aspects seraient fort limitants. Il est clair que le modèle n'est pas encore en mesure, tel quel, de reproduire une saison pollinique dans ses principales phases (début, pic et fin). Il ne produit qu'une succession de journées sans influence aucune de la météorologie du ou des jours antérieurs sur le taux d'émission ou le transport.

En revanche et c'est là un point d'intérêt majeur, étant donné que les quantités émises ne varient pas de jour en

jour, les effets observés sur le nuage résultent uniquement des conditions météorologiques simulées. Le MRCC a déjà prouvé à de nombreuses reprises la fiabilité de ses simulations des conditions atmosphériques (voir référence chapitre 3), si bien que nous sommes tout à fait confiants de l'effet réaliste de ces conditions simulées sur le pollen émis dans le modèle. Les trajectoires suivies par le pollen une fois émis sont probablement en bonne conformité avec ce qu'il se passe dans la nature. La configuration du modèle nous offre alors tout le loisir d'étudier le nuage et son développement avec un bon degré de précision. En effet l'un des principaux atouts de celui-ci est, comparativement à l'observation sur le terrain, d'une part la résolution de 1 km entre deux nœuds de calcul sur la grille, d'autre part sa capacité à fournir des informations selon 4 dimensions (3 spatiales et 1 temporelle), soit sur 25 niveaux dans la verticale et en chacun des points de grille, le tout archivé toutes les 15 minutes. Il est ainsi possible de suivre le nuage de pollen depuis son émission jusqu'à sa déposition selon les 3 dimensions spatiales et d'avoir une idée précise de son évolution tous les ¼ d'heure ce qui est extrêmement intéressant si l'on se rappelle que les techniques d'échantillonnage actuellement disponibles n'offrent pas de précision de lecture et comptage des pollens en deçà de 2 heures. Par ailleurs, la simulation offre le côté plaisant et didactique de l'illustration du phénomène. Le nuage n'est plus une simple construction de l'esprit mais bien un paramètre que l'on peut suivre à l'écran.

Nous avons par ailleurs réalisé 7 simulations de plus de 30 jours chacune à 1 km sans noter de problèmes particuliers de contamination de la fenêtre pas des effets de bordure. Les cycles diurnes se produisent conformément à ce qui est prévu dans le modèle et chaque journée voit le nuage évoluer au gré des paramètres météorologiques simulés. Celui qui a l'effet le plus « visible » est évidemment le vent. En effet, il transporte le nuage selon sa direction dominante et en fonction de sa vitesse également. Le vent vertical que nous avons employé pour expliquer et visualiser certaines zones d'ascendance et/ou de subsidence notées dans le nuage à certaines occasions s'est avéré être un facteur intéressant pour caractériser la stabilité mécanique de l'air. Nous avons pu montrer qu'en fin de journée, le centre ville peut s'avérer être une région plus chaude que les environs et que la combinaison de ce caractère thermique et de la rugosité associée à ce milieu, en fait un milieu beaucoup plus turbulent générant ainsi des conditions d'ascendance plutôt forte. Le profil de la température potentielle est également un bon indicateur de la stabilité dans les basses couches. Selon l'élévation de l'inversion thermique, la couche limite est plus ou moins développée, donc le nuage s'élève plus ou moins haut en altitude. Ainsi dès lors que cette inversion disparaît ou s'atténue, le volume de dispersion augmente et les concentrations à la surface diminuent. Il a ainsi été possible de noter la présence de pollen jusqu'à plus de

1000 mètres en altitude à l'occasion de situations pendant lesquelles la couche de mélange est particulièrement bien développée. En trouver entre 400 et 600 mètres semble par ailleurs être dans la norme.

Telles que les concentrations polliniques sont pensées et conçues dans le modèle, nous avons la possibilité d'étudier la part de pollen provenant de l'île de Montréal et celle venant de l'extérieur sur la quantité totale mesurée. Il semblait intéressant de comprendre dans une optique de santé publique notamment d'où pouvait bien provenir le pollen et comment du pollen extérieur pouvait venir gonfler les concentrations locales. Nous avons pu remarquer dans le cas traité que le pollen émis aux 4 points de mesure est toujours et à 100% insulaire mais que rapidement après l'émission, la part de pollen extérieur sur le total simulé est loin d'être négligeable et souvent même dominante. On peut parler de mesure de fond.

Un autre point est intéressant qui concerne l'étude de l'effet de différents milieux survolés par le nuage sur la propagation du pollen dans l'air et son élimination. Il peut s'agir de la proximité de la rivière ou encore du fait de se trouver en centre-ville tout comme celui de se trouver sur les pentes ou au sommet du Mont Royal. La simulation de trois jours présentée dans le cadre du chapitre 3 montre parfaitement bien l'effet de rivière, d'une part. Le matin, lorsque l'air est plus frais que la température de l'eau qui est prescrite à 20°C, le réseau de rivières qui entoure l'île de Montréal ressort sous la forme d'un réseau d'ascendance de l'air. Si du pollen a déjà été émis à proximité de ces zones, il a plus de chance d'être pris en charge par ces courant ascendants et de s'élever assez haut en altitude. On peut dire que ce réseau agit tel des cheminées, laissant échapper de l'air plus chaud donc plus léger qu'aux alentours et notamment sur la terre ferme. En revanche, l'effet est inversé en fin de journée, lorsque la journée a été chaude. L'eau devient alors plus fraîche que la terre et tend à générer des zones de courants subsidents qui drainent les quelques pollens encore en suspension vers le bas. Le Mont Royal est un autre cas intéressant. En effet, avec la topographie à haute résolution qui est intégrée dans le modèle, le MRCC est en mesure de le détecter et de fait, de détecter son effet sur la circulation locale. Nous pouvons remarquer et ceci est d'autant plus vrai que la vitesse du vent est forte, que lorsque le vent est transversal au Mont Royal, il se crée alors sur la face au vent une zone d'ascendance et sous le vent de ce dernier une zone de subsidence d'origine mécanique mais qui peut être renforcée comme c'est le cas dans la simulation du 28/08/99, en fin de journée par vent du SE alors que le centre ville est une zone déjà bien turbulente. Le nuage de pollen répond parfaitement bien à ces forçages.

L'ensemble de ces observations nous permet de dire sans

trop de craintes de nous tromper que le MRCC est un outil tout à fait adapté pour réaliser ce type d'expérience. Sa fiabilité est un point fort et nous avons confiance dans ses capacités à simuler avec cohérence les conditions de la dispersion du nuage d'ambrosie. Il serait intéressant pour l'avenir de lui apporter les développements nécessaires préalablement abordés, à savoir intégration d'un certain nombre de paramètres phénologiques permettant de tenir compte des conditions printanières, des caractéristiques de la plante, de ses rythmes de floraison..., mais aussi et peut être prioritairement, d'une meilleure intégration des sources de pollen, à savoir une cartographie plus conséquente et de plus grande échelle de la présence de l'ambrosie et de la densité des sources. Le but ultime du développement de ce type d'outil est de parvenir à plus long terme à fournir une prévision pollinique. Pour y parvenir, il sera nécessaire d'intégrer et d'améliorer ces différents paramètres. Enfin, afin de rendre les résultats d'un tel outil plus facilement interprétables par le plus grand nombre d'utilisateurs potentiels qu'ils soient patients ou médecins-allergologues par exemple, un affichage des résultats suivant une échelle de risque est tout à fait envisageable comme il a été présenté aux Figures 3.38-3.40. Cette approche, plus simple permet de donner une idée de l'évolution spatio-temporelle du risque sous telle ou telle condition du temps. Une analyse plus spéciale de ces différentes situations devrait faire l'objet d'une prochaine publication.

## ANNEXES

---

### ANNEXE 1.1 : L'AMBROISIE À FEUILLE D'ARMOISE

#### A1.1-1 Description de la plante

Vincent (1990) décrit la plante comme suit : « Sa hauteur moyenne est de 70 cm et ses feuilles bipinnatifides<sup>1</sup>, sont opposées à la base de la tige alors qu'elles sont en position alterne dans sa partie supérieure. Sa tige est le plus souvent couverte de poils. Ses fleurs sont unisexuées et sont portées par des parties différentes de la même plante. Les fleurs mâles, réunies en capitules, sont regroupées en grappes terminales ou épis (racèmes), pouvant atteindre 15 cm de longueur. Les fleurs femelles, beaucoup plus discrètes, sont logées à l'aisselle des feuilles supérieures. Après fécondation par le pollen, les fleurs femelles se développeront en fruit, plus précisément un achaine (fruit à paroi membraneuse plus ou moins dure et résistante, ne s'ouvrant pas à maturité (Demalsy-Feller, 1990)). Un plant de petite herbe à poux produit environ 3000 achaines, bien que l'on en ait déjà dénombré sur un individu particulièrement vigoureux plus de 60 000 (Dickerson et Sweet, 1971 ; Delabays *et al.*, 2002). » Chaque fruit ne contient qu'une graine munie de 5 ou 6 épis émoussés. La majorité de la production des achaines se retrouve dans le sol dans un rayon de 2 mètres du plant. Selon Mandeville (1994) la dispersion de ces achaines est surtout le fait de l'eau, des oiseaux ou des humains. Leur présence est également largement avérée dans les sacs de graines pour oiseaux (cas de la Suisse (Delabays *et al.* 2002)). Si ces graines tombent à la surface, elles peuvent normalement germer très facilement lors de la saison suivante. Cette très grande facilité d'installation est là un de ses caractères de plante pionnière. Pour cela, elles doivent seulement subir une phase de stratification (période de gel) avant de connaître une nouvelle germination. Il est reconnu que certaines d'entre elles peuvent même demeurer jusqu'à 40 ans en dormance (Basset *et al.*, 1975, Société d'animation du Jardin et de l'Institut botanique de Montréal, 1990) tant que les conditions favorables à leur épanouissement ne sont pas réunies. La levée de la dormance se fait pendant l'hiver grâce aux températures basses de la saison. Si les conditions extérieures ne sont pas favorables à leur germination, elles entament une nouvelle phase de stratification (Bazzaz, 1970) de même que si la compétition est trop importante (Barbour *et al.*, 1970).

Du fait de son caractère de plante pionnière et rudérale, elle ne s'installe que dans des sols perturbés. Ses terrains de prédilection sont les sols de type argileux, loameux et sablonneux, tolérant un PH et un taux d'humidité très larges. Elle n'est pas exigeante en termes de qualité du sol et son point fort est l'opportunisme. Elle apprécie toutefois plus spécialement les terrains chauds et riches en substances nutritives et préfère donc les sols plutôt légers, secs et enrichis, d'un PH neutre ou peu acide (Delabays *et al.*, 2002). Elle pousse ainsi là où la plupart des plantes ne peuvent s'implanter mais ne supporte en revanche pas la concurrence des plantes qui lui succèdent. Elle est dite ubiquiste (Vincent, 1990). Les routes en milieu rural de même que les dépôts à neige sont parmi les endroits les plus infestés au Québec. Les abrasifs accumulés et le compactage des sols par la machinerie lourde rendent difficile la croissance des autres végétaux et favorisent son établissement hâtif voire unique. Lorsque le sol est dénudé de végétation comme les terrains à développement résidentiel, commercial et industriel, elle prolifère. Les infestations sont à redouter dans les cultures de tournesol d'autant qu'elle appartient à la même famille ce qui rend très difficile son contrôle chimique. Elle peut dans ce cas-là devenir extrêmement concurrentielle. Il arrive aussi qu'elle puisse germer après une récolte de colza ou de céréales de même que dans les friches et jachères qui nécessitent une surveillance accrue. On la trouve rarement en revanche en terrain forestier. En dépit de tous ces aspects forts de son caractère, elle n'est pas pour autant compétitive. La présence d'autres plantes empêche sa croissance. C'est pourquoi le maintien d'un couvert végétal semble être l'un des moyens de contrôle les plus efficaces contre sa propagation (Ministère du transport Québec, 1998<sup>2</sup> ; Déchamp *et al.*, 2002 ; Thomet, 2003 ; Dethiollaz, 2004). Ces détails sont importants afin de localiser les éventuelles sources potentielles de la plante dans une région donnée en se basant sur les types de sol, le type d'occupation et de gestion des sols.

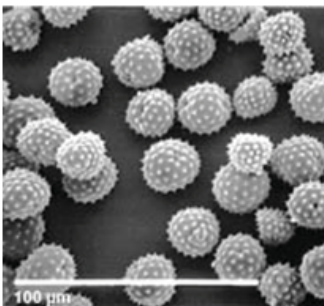
<sup>1</sup>Bipinnatifides : divisées par la nervure principale en lobes incisés dentés.

<sup>2</sup> Site du Ministère des Transports du Québec : <http://www.mtq.gouv.qc.ca/fr/ministere/environnement/index.asp#diversite>, consulté le 25/04/06.

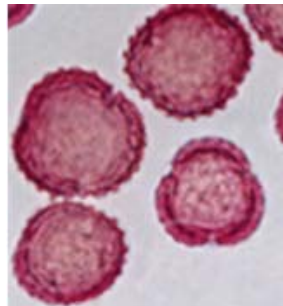


### A1.1-2 Implantation dans le monde

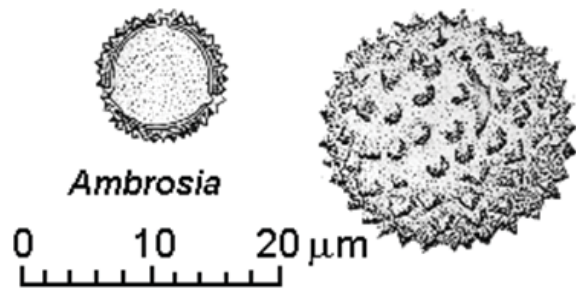
Depuis un siècle, elle s’est largement implantée ailleurs dans le monde tel que l’atteste Déchamp (1995). On la trouve désormais en Chine, en Corée, au Japon, en Russie, en Australie (Bass *et al.*, 2000) où elle est apparue dans le Queensland durant les années 1930, en Europe centrale où ces trois espèces sont représentées ainsi que *Ambrosia maritima* L. qui est une espèce méditerranéenne autochtone et *Ambrosia tenuifolia* Soreng (originaire d’Amérique du Sud) qui ne sont pas allergènes (Laiidi, 1997). Restée longtemps discrète, elle a commencé à devenir localement présente depuis les années 1950 et est depuis, très bien installée dans certains pays d’Europe centrale tels la Hongrie dont elle a fait son principal foyer (Rybnck *et al.*, 2001, Jarai-Komlódi *et al.*, 1993 ; Feher *et al.*, 1997 ; Juhasz *et al.*, 1996) et où Makra *et al.* (2004) estiment que 30% de la population hongroise présente des allergies, que 65% d’entre-elles le sont au pollen dont au moins 60% au pollen de l’ambrosie en particulier. Elle l’est également en Slovénie et Croatie (Mitic *et al.*, 2004 ; Rybnck *et al.*, 2001), en Bulgarie où son pollen fait l’objet d’études depuis 1991 (Yankova *et al.*, 2000), ainsi que timidement en Pologne (Stepalska *et al.*, 2002). En Autriche, Jäger (1989) considérait que la plus grande partie du pollen comptabilisé provenait essentiellement de Hongrie, transporté par les vents du Sud-est. Depuis il semble que de nombreux plants se sont installés à proximité des grandes villes et qu’aujourd’hui 11 à 17% des Viennois souffrant d’allergie respiratoire sont sensibles à cette plante (Jäger, 1991). On en trouve également quelques petits foyers encore limités dans les Pays Baltes (Saar *et al.*, 2000). Elle serait apparue en France dès 1865 après son introduction par le biais de sacs de graines de fourrage importés d’Amérique du Nord en 1863 (Déchamp *et al.*, 2002) mais son développement intense daterait de 1964. Elle a étendu son aire de distribution vers le Sud le long de la vallée du Rhône (Harf *et al.*, 1992) tant et si bien qu’elle est désormais très bien installée dans la région Rhône-Alpes (Cosson, 2002 ; Déchamp *et al.*, 2002) où selon Deloraine *et al.* (2001) 8.5% de la population serait allergique à l’ambrosie avec certaines disparités très marquées entre régions. On la trouve désormais mais en petites quantités encore en Suisse (Leuschner, 1978, 1990 ; Peeters, 2000 ; Delabays *et al.*, 2002 ; Clot, 2003), en Belgique. Elle a envahi le Nord de l’Italie où elle a été signalée pour la première fois en 1902 (Mandrioli *et al.*, 1998) mais où elle n’est que peu significative à Turin (Carosso *et al.*, 2000) en dépit d’une forte présence ailleurs en Lombardie, en Vénétie ou dans la plaine du Pô. Dans des pays plus nordiques comme la Suède, elle n’a pas été considérée comme étant un risque avant 1995 bien elle ait déjà été identifiée en 1866 (Déchamp, 2002). Toutefois au cours des dernières années, on en a trouvé des plants à l’Est de Göteborg. Les graines se sont certainement développées au profit d’étés plus chauds, ce qui laisse présager qu’éventuellement la situation pourrait s’aggraver dans le cas d’un réchauffement du climat (Dahl *et al.*, 1999). Il en est de même en Grande-Bretagne (Rich, 1994).



Source : <http://www.stormbefore.com/Images/ragweed.jpg>



Source : <http://www.stormbefore.com/Images/ragweed.jpg>



Source : <http://www.stormbefore.com/Images/ragweed.jpg>



Source : <http://www.rsqa.qc.ca/ps02rsgf.htm#herbe7>







Source : <http://www.rsqa.qc.ca/ps02rsgf.htm#herbe7>

**Espèce :** Petite herbe à poux communément retrouvée au Québec

**Nom latin :** *Ambrosia artemisiifolia* L.

Les fleurs jaunâtres se dressent en épis au mois d'août.

Ses feuilles sont d'un vert uniforme des deux côtés.

Ses feuilles sont très découpées et minces.

Sa tige velue supporte les feuilles opposées à la base et alternées dans le haut.

À maturité, elle mesure entre 10 et 100 cm.

Colonisatrice, elle prolifère dans les habitats arides et ensoleillés.

Elle commence à libérer son pollen dès le mois d'août pour atteindre une concentration maximale entre le 25 et le 30 août (risque d'allergie).

On la retrouve aux abords des trottoirs, des ruelles, des amoncellements rocheux, des voies de chemin de fer, des chantiers de construction, des terrains vacants, etc.

Source : site du RSQA : <http://www.rsqa.qc.ca/ps02rsqf.htm#herbe5>



## ANNEXE 1.2 : TURBULENCE DANS LA CLA – ORIGINE ET MESURE

### A1.2-1 Origine thermique

Le gradient thermique que l'on associe à la stabilité d'origine thermique, est le paramètre le plus utilisé pour caractériser le pouvoir dispersif de l'atmosphère. Pour parvenir à comprendre quels processus sont impliqués dans les mouvements verticaux il est intéressant de considérer ce qui arrive à une parcelle d'air. On pose comme condition que l'ascendance de cette parcelle d'air de la taille d'un petit nuage est suffisamment rapide pour qu'il n'y ait pas d'échange d'énergie avec le reste de l'atmosphère. On dit que cette parcelle se déplace selon le gradient de l'adiabatique. En s'élevant elle rencontre des conditions de pression atmosphérique de plus en plus faible du fait de la décroissance de la masse atmosphérique avec l'altitude. Elle se détend donc, prend de l'expansion. Lors de cette expansion, la parcelle d'air libère de l'énergie pour déplacer l'air autour d'elle. La seule source d'énergie disponible étant thermique, elle se refroidit au fur et à mesure de son ascension. Des mesures ont pu montrer que dans des conditions d'air sec non saturé, le taux de variation de la température est de 9.8°C/Km. C'est ce que l'on appelle le gradient adiabatique de l'air sec ( $\Gamma_s$ ). Toutefois un gradient aussi important se rencontre rarement car l'air n'est jamais totalement sec. En réalité, dans la basse troposphère l'air est plutôt humide ce qui fait qu'il atteint la saturation relativement rapidement. La vapeur d'eau condense et la formation de gouttelettes d'eau entraîne la libération de chaleur latente, qui a pour effet de ralentir le taux de refroidissement de la parcelle d'air. On parle alors de gradient adiabatique de l'air humide ou gradient pseudo adiabatique humide ( $\Gamma_h$ ). Il se situe autour de 6.5°C/Km mais cette valeur n'est pas une constante. La parcelle d'air cesse son ascension aussitôt qu'elle se trouve en équilibre avec son environnement. La chaleur qu'elle contient se dissipe par mélange avec l'air environnant. Si elle se déplace en revanche vers le bas, les processus inverses se produisent. Elle se comprime avec l'augmentation de la pression atmosphérique et s'échauffe.

Ces notions d'adiabaticisme sont théoriques. Elles ne sont pas applicables telles quelles dans la nature mais permettent une bonne approximation de ce qui se passe dans la CLA. En effet, les conditions réelles de variation de la température avec l'altitude sont souvent très différentes du gradient adiabatique. Il est de ce fait très important de considérer les trois conditions type de stabilité de l'atmosphère : instabilité, neutralité et stabilité. Il ne faut pas en effet confondre le gradient adiabatique de l'air sec du gradient environnemental qui est lui, la mesure de la structure thermique actuelle à l'aplomb d'un point donné telle qu'enregistrée sur le terrain par des senseurs. Ce gradient varie dans le temps et dans l'espace et est déterminant de la compréhension que l'on peut avoir de l'état de la stabilité de la couche d'air. L'évaluation de la stabilité atmosphérique est réalisable en comparant ce gradient environnemental (GE) au gradient adiabatique de l'air sec ( $\Gamma_s$ ) (Figure A1.2-1).

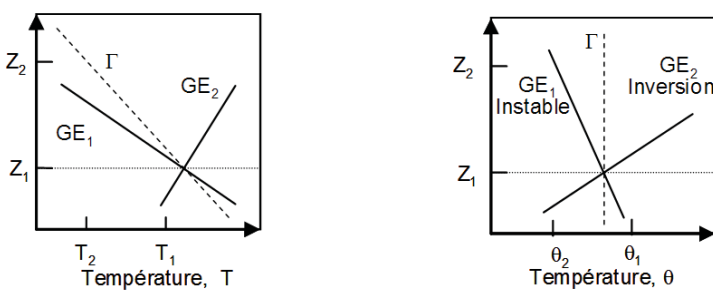


Figure A1.2-1 : Représentation graphique du gradient environnemental. Adapté de Stull (1989)

L'instabilité correspond à un gradient environnemental plus fort que le gradient adiabatique de l'air sec ( $\Gamma_s$ ). On parle de gradient sur adiabatique. La décroissance de la température est supérieure au gradient adiabatique sec. Cette situation est typique de journées ensoleillées, à proximité de la surface lorsque le réchauffement du sol par le soleil est intense. Si une parcelle d'air se déplace vers le haut dans de telles conditions, elle est toujours plus chaude que l'environnement extérieur. Dans ces conditions elle continue à s'élever voire accélère son mouvement. Plus le gradient environnemental est faible, plus l'écart avec l'adiabatique sec est grand et plus l'instabilité est marquée. Le degré de cette instabilité est également fonction de l'humidité contenue dans l'air, de la profondeur de la couche de mélange et de la vitesse du vent.

La neutralité existe lorsque la décroissance de la température avec l'altitude est proche du gradient adiabatique de l'air sec. Ainsi lorsqu'une parcelle d'air se déplace vers le haut ou vers le bas, elle est à la même température que l'atmosphère

environnante, donc a la même densité. Elle n'a donc pas tendance à accélérer son mouvement. Ce type de situation se produit particulièrement à la base des nuages par conditions venteuses. Le réchauffement de la surface est limité par la présence du couvert nuageux ce qui crée une stratification verticale de l'atmosphère. Le flux d'air initié par le vent permet d'égaliser la température de l'air dans les basses couches de l'atmosphère par le biais d'un procédé mécanique.

Enfin, la stabilité se caractérise par un gradient environnemental inférieur au gradient adiabatique, c'est-à-dire lorsque la température de l'air diminue moins rapidement avec l'altitude. Dans ce cas, lorsqu'une parcelle d'air est soumise à un mouvement ascendant, elle est toujours plus froide que son environnement, donc plus dense. Elle va donc toujours avoir tendance à redescendre pour retrouver son état initial. Plus la différence entre le gradient environnemental et celui de l'adiabatique sec est grande, plus l'air est stable.

Pour estimer l'état de la stabilité de l'atmosphère, on emploie souvent le paramètre de la température potentielle<sup>3</sup> ( $\theta$ ) plutôt que la température de l'air ( $T_a$ ), ceci dans un souci de standardisation. En effet, une parcelle d'air se déplaçant verticalement est soumise aux effets de la variation de pression. La température potentielle d'une parcelle d'air est la température qu'elle aurait si elle était ramenée à une pression de 100 kPa. Lorsqu'on la compare au gradient adiabatique de l'air sec alors l'air est neutre, lorsque température potentielle et gradient adiabatique sont verticaux, il est instable lorsque la température potentielle diminue avec l'altitude et stable lorsque c'est l'inverse (Figure A1.2-1). Selon Stull (1989), la température potentielle que l'on définit habituellement comme :

$$\theta = T \left( \frac{P_0}{P} \right)^{0.286} \quad \text{eq.1}$$

où,  $P$  est la pression de l'air et  $P_0$  est la pression de référence (100 kPa), peut être estimée en première approximation de la manière suivante :

$$\theta = T + \left( \frac{g}{C_p} \right) \cdot z \quad \text{eq.2}$$

où,  $z$  est la hauteur au-dessus de 100 kPa,  $g$  l'accélération gravitationnelle (9.81 m/s<sup>2</sup>) et  $C_p$  est la chaleur spécifique de l'air à pression constante. La quantité  $g/C_p = 0.0098$  K/m est juste l'inverse du gradient adiabatique de l'air sec ( $\Gamma_s = 9.8^\circ\text{C/km}$ ).

Ces conditions de stabilité ne se produisent cependant jamais aussi simplement dans la réalité. Certes, il y a le rythme diurne que l'on a abordé dans la section 1.1.3, mais en plus de cela, il peut arriver que l'atmosphère soit en réalité composée d'une superposition de couches de stabilité différente (Figure A1.2-2). Il peut ainsi arriver que la couche de mélange instable soit chapeauté d'une couche d'air plus stable, une zone d'inversion qui joue alors le rôle de trappe. Elle maintient alors des concentrations élevées de pollen par exemple entre la surface et la base de l'inversion. Cette superposition de couches d'air de qualité différente peut aussi être causée par l'advection d'air plus froid ou plus chaud, ce qui accroît ou limite le développement de la turbulence.

<sup>3</sup>Température potentielle : Température ( $\theta$ ) que prendrait une parcelle d'air si elle était amenée, selon un processus adiabatique sec, à une pression de 1000 hPa.

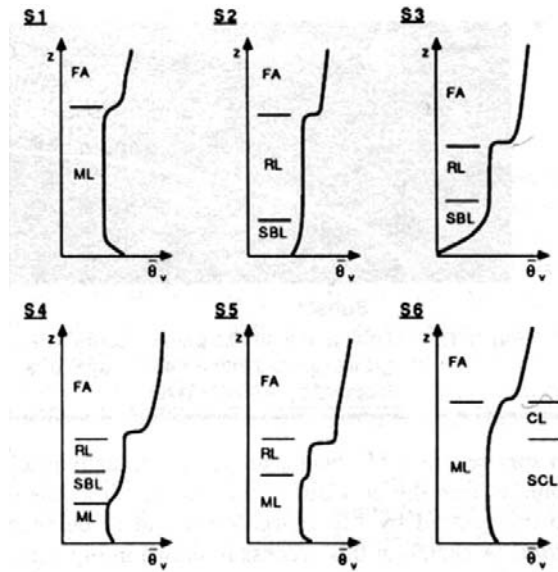


Figure A1.2-2 : Profils de la température virtuelle potentielle au cours de l'évolution de la CLA. Les lettres en haut de chaque graphique font référence aux points indiqués sur la Figure 1.8. ML : couche de mélange, FA : atmosphère libre, SBL : couche limite stable, CL : couche de nuages, SCL : couche de nuage stable et RL : couche résiduelle. D'après Stull (1989)

### A1.2-2 Origine mécanique

La rencontre de l'obstacle, quel qu'il soit (arbre ou immeuble) induit une décélération du flux d'air qui est maximale lorsque la rencontre se fait orthogonalement à l'obstacle. Les profils verticaux sont particulièrement marqués lorsque le

vent est fort. Sur la Figure A1.2-2,  $z_g$  correspond au sommet de la couche limite au-delà duquel  $\bar{u}$  est à peu près constant avec la hauteur. La profondeur de la couche de mélange, augmente avec la rugosité de la surface. De ce fait, le gradient

vertical de la vitesse moyenne du vent ( $\delta \bar{u} / \delta z$ ) est plus fort au dessus d'une surface lisse et plus petit sur une surface rugueuse. Lorsque le vent est faible, la profondeur de cette couche de mélange est déterminée par l'état de la convection thermique. Ainsi  $Z_i$ , la hauteur de la couche de mélange est plus grande lorsque la surface est chaude que lorsqu'elle est froide. Inversement tout obstacle opposé au flux d'air exerce aussi une force opposée et égale à la précédente. La couche limite se trouvant au-dessus d'objets isolés est irrégulière et ces obstacles perturbent le mouvement moyen de l'air en générant des tourbillons en aval dans leur sillage.

La force que l'air exerce à la surface du sol dans la direction du flux d'air est la conséquence directe du transfert de quantité de mouvement qui se produit dans la couche limite. Elle est connue comme étant la friction de surface ( $\tau$ ) (Emberlin, 1994). Celle-ci génère du cisaillement à la surface que l'on exprime en pression (Pa, force par unité de surface). Cette force est égale mais opposée à celle exercée par la surface sur l'atmosphère. Toutefois, l'atmosphère étant un fluide, elle agit uniquement sur la basse atmosphère. De ce fait, la couche d'air influencée par cette friction génère cette force de cisaillement et la transfert vers le bas sous la forme d'un flux de momentum. Ce flux est matérialisable comme étant la

multiplication du vent moyen ( $\bar{u}$ ) par la densité de l'air ( $\rho$ ). Etant donné que l'on considère la densité de l'air constante, alors le flux de momentum varie en fonction du profil de vent moyen. Sur la Figure 1.11, si nous nous trouvons en  $Z_3$ , du fait du cisaillement généré par la rugosité de la surface, on assiste à un déplacement de tourbillons de turbulence, vers le haut ou vers le bas. Ceux-ci proviennent d'un niveau supérieur ont pour effet d'accroître la vitesse et l'inverse est observé avec un tourbillon ascendant. On peut de ce fait écrire que dans une couche turbulente :

$$\tau = \rho \cdot K_M \frac{\delta \bar{u}}{\delta z} \tag{eq.3}$$

où,  $K_M$  est le coefficient de diffusion turbulente ( $m^2 s^{-1}$ ) qui correspond en fait à la capacité des tourbillons à transférer du momentum. On peut s'attendre également à ce que pour une surface de rugosité donnée,  $\tau$  soit fonction de  $\bar{u}$ . Etant donné

que  $\bar{u}$  augmente avec l'altitude, le flux de momentum va en faire autant. C'est ce qui va influencer la profondeur de la couche de mélange. De la même façon si l'on considère une vitesse de  $\bar{u}$  constante au-dessus de surfaces de différentes rugosités, l'activité convective sera la plus forte sur la surface la plus rugueuse.

Sous des conditions neutres, on considère que la vitesse moyenne du vent augmente de manière logarithmique avec l'altitude. On peut donc écrire :

$$\bar{u}_z = \frac{u^*}{k} \ln \frac{Z}{Z_0} \tag{eq.4}$$

où,  $\bar{u}_z$  est la vitesse moyenne du vent (m s-1) à la hauteur Z,  $u^*$  la vélocité de friction (m/s) et  $k$  la constante de Von

Karman (~ 0.40),  $Z_0$  la longueur de rugosité (m). Il est connu que le stress de cisaillement est proportionnel au carré de la vitesse de du vent à une hauteur de référence. Ainsi, nous pouvons écrire :

$$u_*^2 = \tau / \rho \tag{eq.5}$$

or,  $u_*$  peut être estimé à partir du profil mesuré du vent. En effet, la pente équivaut à  $k/u_*$ . Ainsi nous obtenons  $\tau$ . La

longueur  $Z_0$  est une mesure de la rugosité aérodynamique de la surface. Elle est relative mais non égale à la hauteur des obstacles. Elle tient également compte de la forme et de la densité de la distribution des éléments. Le Tableau A1.2-1

présente les valeurs caractéristiques de  $Z_0$  que complète la Figure A1.2-3.

Surface et terrain types	$Z_0$ (m)
Eau	0.1 – 10.0 10-5
Glace	0.1 10-4
Sable	0.0003
Herbe	0.04 – 0.20
Culture agricole	0.04 – 0.20
Forêt décidue	1.0 – 6.0
Forêt de conifères	1.0 – 6.0
Installations dispersées (fermes, villages, arbres...)	0.2 – 0.6
Suburbain faiblement dense	0.4 – 1.2
Suburbain fortement dense	0.8 – 1.8
Urbain fortement dense, moins de 5 étages	1.5 – 2.5
Urbain fortement dense, nombreux étages	2.5 – 10

Tableau A1.2-1 : Valeurs typiques de la hauteur de rugosité pour différentes surfaces et types de terrains. D'après Oke (1987)

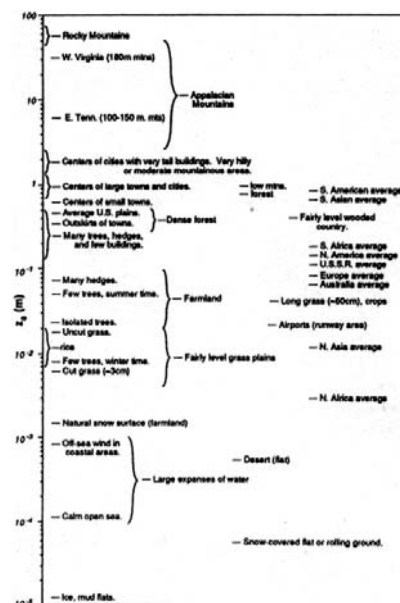


Figure A1.2-3: Longeur de rugosité aérodynamique pour différents types de surfaces. D'après Garratt (1977), Smedman-Högström (1978), Kondo et Yamazawa (1986), Thompson (1978), Napo (1977) et Hicks (1975) et adapté par Stull (1989)

Toutes les conditions que nous venons de présenter sont valables sous des conditions neutres, lorsque du fait d'un couvert nuageux, la convection thermique est limitée. Ce sont alors les vents forts qui favorisent le mélange et empêchent à une stratification thermique de s'installer dans la verticale. A proximité de la surface, la turbulence générée par la friction est dominante. Ces tourbillons sont circulaires et voient leur amplitude croître avec l'élévation en altitude. Lorsque les conditions sont instables, le déplacement dans la verticale des tourbillons est accru et, par le même fait, le flux de momentum également. A proximité de la surface les effets mécaniques sont toujours dominants mais la convection thermique est également bien développée et tant à augmenter. Les tourbillons subissent alors un effet de stretching et se trouvent étirés accompagné d'une réduction du gradient du vent (c). Inversement la stabilité limite le mouvement vertical

et augmente le gradient du vent en fonction de l'altitude.

Oke (1987) conclut en mentionnant que la connaissance de la forme du profil du vent est importante afin de déterminer l'état de la turbulence. Cette question est centrale pour ce qui est du transport de chaleur et de la vapeur d'eau mais aussi dans le cas qui nous intéresse celui du pollen.

### A1.2-3 Outils permettant le calcul de l'état de la stabilité de la C

Afin de déterminer le degré de turbulence d'un flux d'air, Munn (1966) employait, en atmosphère contrôlée, le nombre de Reynolds. Dans la réalité, il vaut mieux employer ou bien le nombre de Richardson ou le paramètre de Monin-Obukov (Webb, 1965) lorsque l'on est loin de contrôler tous les paramètres de l'expérience. Dans le cas présent, en nous basant sur Oke (1987) et Stull (1989) nous décrivons le nombre de Richardson qui est probablement le moyen le plus pratique pour faire cette estimation dans les basses couches de l'atmosphère. Il fournit le rapport entre l'énergie potentielle et l'énergie cinétique. Son objectif est de déterminer les différents régimes turbulents. Il peut s'écrire de la manière suivante :

$$R_i = \frac{g}{T} \cdot \frac{(\Delta\bar{T}/\Delta z)}{(\Delta\bar{u}/\Delta z)^2} \quad \text{eq. 6}$$

où,  $g$  est l'accélération gravitationnelle ( $m\ s^{-2}$ ),  $\bar{T}$  est la température moyenne dans la couche d'air  $\Delta z$  (K) et  $R_i$  un nombre sans dimension. Les termes de l'éq. 6 montrent la part relative de la turbulence d'origine thermique (au numérateur) et celle d'origine mécanique (au dénominateur) dans l'estimation de la stabilité du flux. Ainsi lorsque le gradient est fort

(instabilité), les forces libres dominent.  $R_i$  est alors un nombre négatif qui augmente avec l'accroissement du gradient thermique et diminue avec une augmentation du gradient de la vitesse du vent. Pour des valeurs se situant autour de  $-0.1$  alors la convection est d'origine mixte mais au-delà de  $-10$ , elle libre donc exclusivement thermique. Cette situation est typique d'une situation d'été lorsque la masse d'air présente une forte instabilité due au développement de nuages

convectifs et d'orage. Dans le cas d'une situation d'inversion,  $R_i$  est positif. L'énergie cinétique turbulente disparaît. Cette condition est typique de périodes anticycloniques, alors que la subsidence tend à stabiliser la masse d'air. Enfin lorsque l'atmosphère est neutre, il tend à s'approcher de 0. A ce moment-là la convection est d'origine exclusivement forcée. Quoiqu'il en soit, il n'indique en aucun cas quelle est la force de la turbulence mais bien si elle existe ou pas.

Pour conclure cette question de la turbulence, il est possible de dire que d'un point de vue convectif, les pires conditions de dispersion du pollen sont associées à une forte stabilité thermique que l'on retrouve en conditions d'inversion. Dans ce cas la turbulence est inexistante et la plupart des mouvements verticaux sont inhibés. Différents types d'inversion peuvent voir le jour. Parmi elles il est possible de citer les inversions par refroidissement, par réchauffement du fait de la subsidence de l'air dans un anticyclone par exemple ou encore d'origine mécanique dont une bonne description est donnée entre autre par Oke (1987) ou Leduc *et al.* (1985). Inversement, les meilleures sont associées à une forte instabilité et une couche de mélange bien développée, caractéristiques de conditions diurnes ensoleillées et estivales. La région d'intérêt dans ce projet est la grande région de Montréal. Nous avons abordé le fait que le type de surface est déterminant de ces conditions qui vont se développer et favoriser ou non la dilution et le transport du pollen dans l'air. Nous ne pouvons donc passer sous silence l'influence déterminante d'un milieu urbain sur la circulation régionale. Il s'agit de l'objet de la prochaine section.



## ANNEXE 2.1 : STATISTIQUES NON PARAMÉTRIQUES ET ANALYSES PRÉLIMINAIRES

### A2.1-1 Justification du type de statistique employée

Le choix de la statistique la plus appropriée est une étape décisive dans le processus de recherche. Il arrive en effet souvent qu'il faille sélectionner un ou plusieurs tests parmi d'autres et pour cela il faut tenir compte d'un certain nombre de critères rationnels. La puissance du test est un de ces critères mais on ne doit pas oublier que la puissance de l'analyse est elle-même fonction du test employé. Un test statistique se révèle « bon » si la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle d'égalité des distributions d'origine  $H_0$  est petite quand  $H_0$  est vraie et forte quand elle est effectivement fausse. Parmi les autres critères entrent aussi d'une part la manière selon laquelle a été obtenu l'échantillon, mais aussi la population d'origine, le type de mesures effectué, le type de données, la classification (nominale, ordinale, par intervalle ou de rapport)... La plupart du temps nous assumons que les caractéristiques spécifiques d'un modèle statistique sont rencontrées. Le sens que l'on peut alors donner aux résultats obtenus par le biais de ces tests est complètement dépendant de la validité de ces assumptions. Les tests les plus puissants sont généralement ceux qui présentent les assumptions les plus nombreuses comme c'est le cas pour les tests t et F par exemple, tous deux paramétriques. Lorsque celles-ci sont remplies, alors les chances de rejeter  $H_0$  quand elle est fausse, sont effectivement grandes. Par ailleurs, les tests paramétriques exigent que les données analysées soient au moins du type « intervalle », c'est-à-dire quantitatives. Les tests non paramétriques quant à eux, n'ont aucune exigence de la sorte. Bien que l'on s'attende à l'indépendance des observations ainsi qu'à la continuité des échantillons, les assumptions des tests non paramétriques sont beaucoup moins nombreuses et moins exigeantes que dans le cas des tests paramétriques. Ils ont la capacité de traiter des données de type ordinal voire même nominal ce qui est exclus avec les tests paramétriques. Les statistiques non paramétriques présentent le grand avantage de ne pas reposer sur les paramètres des distributions et par conséquent sur la distribution d'échantillonnage de ceux-ci. En anglais, leur nom est « *free distribution statistics* ». Cette propriété leur confère l'avantage considérable de ne jamais être assujetties à la loi de distribution de la population d'origine. Ainsi, elles sont tout à fait adaptées pour de petits échantillons. Selon Hollander *et al.* (1999), elles ne requièrent pas les traditionnelles assumptions de normalité des populations d'origine. Par ailleurs, elles offrent la possibilité à l'utilisateur d'obtenir des valeurs exactes de P pour les tests, des intervalles de confiance exacts, des taux d'erreurs dus à l'expérimentation lors de comparaisons multiples. Ces techniques sont par ailleurs généralement assez simples à appliquer et à comprendre. Il peut sembler que ces techniques sacrifient une grande part de l'information de base mais la pratique et les investigations théoriques ont montré que ce n'était pas le cas. Nous savons par ailleurs que la puissance d'un test paramétrique augmente avec la taille de l'échantillon N et qu'il est la plupart du temps difficile de répondre à toutes les assumptions des tests paramétriques, si bien que l'usage des statistiques non paramétriques est tout à fait adapté. Ces techniques sont un peu moins efficaces que leurs congénères paramétriques lorsque les populations d'origine sont réellement normales alors qu'elles s'avèrent moyennement voire largement plus efficaces qu'elles, lorsque les populations d'origine ne sont pas normales. Il faut toutefois noter que plus la taille de l'échantillon est grande, moins ces statistiques sont appropriées et ceci pour deux raisons principalement. La première est que la statistique paramétrique devient de plus en plus robuste lorsque l'échantillon est grand et la seconde, plus pratique, relève d'une complexité plus grande à effectuer certains calculs laborieux à partir de la statistique non paramétrique. Si toutes les assumptions d'un test paramétrique sont effectivement rencontrées alors l'usage d'un test non paramétrique dans ce cas, résulte en une perte d'information conséquente. En revanche, les statistiques non paramétriques sont utilisables dans de nombreux cas pour lesquels les statistiques paramétriques ne le sont pas, celles-ci nécessitant la magnitude des phénomènes alors que les précédentes se satisfont de rangs.

Il est la plupart du temps difficile de déterminer la distribution de probabilité qui correspond le mieux aux échantillons étudiés et ceci soit car soit la population statistique est inconnue soit parce que la taille des échantillons est trop petite comparativement à la vraie population. Afin de déterminer le type de statistique que nous allons employer, nous avons testé dans un premier temps la différence entre la distribution des échantillons polliniques et la distribution normale. Nous avons pour cela appliqué à chacun des échantillons de concentrations polliniques le test Anderson-Darling (Dytham, 1999) qui teste la normalité des échantillons au même titre que le test de Kolmogorov-Smirnov ou de celui du  $\chi^2$ , autres tests de conformité. La distribution normale est symétrique, continue et décrite par 2 paramètres, la moyenne  $\mu$  qui exprime la position et l'écart type  $\sigma$  qui traduit l'étalement. On parle également de distribution Gaussienne. Il est connu que les conditions de la normalité sont rarement réunies lorsque l'on parle de pollen dont la distribution s'approche plutôt d'une distribution de type Gamma (Comtois, 2000). Ainsi, la valeur de P reportée dans le Tableau A2.3-1 est la probabilité qu'ont les données d'être normalement distribuées. Si  $P < 0.05$ , les données ne suivent pas une distribution normale et la statistique non paramétrique est préconisée. Les résultats présentés confirment la non normalité des échantillons.

Toutes ces raisons réunies nous ont amené à faire le choix éclairé, d'employer des statistiques non paramétriques au long de cet exercice. Il est délibérément choisi de travailler à partir des échantillons tels quels, sans normalisation préalable et d'utiliser des statistiques non paramétriques. La normalisation des échantillons risquerait en effet de rendre l'interprétation des résultats complexe et sans signification particulière. Or, l'objectif est de parvenir à formuler des résultats fiables et aisément transposables dans le langage de tout un chacun intéressé par la question de la dispersion du pollen et des allergies.

## A2.1-2 Analyses préliminaires

### A2.1-2.1 Homogénéité des échantillons

Il arrive souvent que des données soient manquantes du fait d'un mal fonctionnement ou d'une erreur de manipulation ou tout bonnement parce que les prises de mesure ont été interrompues pour une raison ou pour une autre avant le 30 septembre de l'année en cours sans que nous n'en connaissions la raison. Nous avons donc commencé par vérifier l'homogénéité des échantillons afin de voir si les journées manquantes risquaient d'avoir une quelconque influence sur la qualité des résultats attendus. La Figure fournit un état du nombre de ces journées manquantes par site et par année.

Le test T de Wilcoxon pour deux échantillons appariés nous permet dans un premier temps de tester s'il existe des différences notables entre le nombre de données disponibles en août et en septembre à chaque station. Il s'agit du test par excellence à appliquer aux variables quantitatives non normales et aux variables semi quantitatives (Sherrer, 1984). Il s'applique sitôt que le test de comparaison de moyennes pour échantillons appariés ne s'applique plus. A la différence du test du Signe, également approprié dans le cas d'échantillons appariés, celui-ci tient compte à la fois de la direction et de la magnitude de la différence entre les rangs en assignant un poids différent selon qu'une différence est plus ou moins marquée. Il consiste à calculer les différences  $d_i$  ( $d_i = x_{i1} - x_{i2}$ ) de chaque paire de données. Il est de ce fait plus puissant (Siegel, 1954). Les règles de décision de ce test sont proposées dans le Tableau A2.3-2 et s'appliquent comme dans le cas du test U de Wilcoxon-Mann-Whitney qui sera présenté ultérieurement. Dans le cas présent, la taille des échantillons est inférieure à 60 il faut donc calculer la distribution exacte de T. Les résultats figurent dans le Tableau A2.3-3. Il ressort que seule la station Ouest qui présente respectivement en septembre 1997 et septembre 2003, 14 et 13 journées manquantes, compte à ces occasions des journées significativement manquantes d'un mois à l'autre de la saison d'ambrosie.

Nous avons ensuite voulu contrôler si pour un mois donné, d'années en années, de même que pour la saison complète, le nombre de journées manquantes variait beaucoup d'une station à une autre. Le *test U de Wilcoxon-Mann-Whitney* a été appliqué à cet égard (Tableau A2.3-4) pour les stations VL et CV de 1996 à 2002 et le *test de Kruskal-Wallis* (Tableau A2.3-5) pour les stations CV, Est et Ouest de 1997 à 2003. Les résultats Figurent respectivement dans les Tableaux A2.3-6 et A2.3-7. Le *test de Wilcoxon-Mann-Whitney* également appelé *test U*, compte parmi les tests statistiques non paramétriques permettant de comparer deux échantillons indépendants. Il cherche à vérifier si les éléments de deux groupes classés par ordre croissant sur une même échelle ordinale occupent des positions (rangs) équivalentes révélant la similitude des deux distributions. Dans la mesure où les échantillons sont plus grands que 20, ils sont dits « grands échantillons » et dans ce cas là, plus  $n_1$  et  $n_2$  augmentent, plus la distribution d'échantillonnage de U converge en probabilité vers une loi normale (Mann et Whitney, 1947). D'après Siegel (1956), le *test U* a une puissance équivalente à 95% de celle d'un *test t* lorsque les données se distribuent normalement. Toutefois dès que l'on s'écarte des conditions idéales d'application du *test t*, la puissance du test U devient supérieure. Le test de Kruskal-Wallis est quant à lui un test de comparaison de k échantillons indépendants. Son premier intérêt est d'être centré sur la position relative des médianes des  $k \geq 3$  populations étudiées. L'hypothèse nulle  $H_0$  considère le fait qu'il n'existe pas de différences entre les positions des médianes des populations d'origine, signifiant par là que les k échantillons peuvent être traités comme provenant d'une seule et unique population d'origine. L'hypothèse alternative  $H_1$  stipule qu'il existe des relations non nulles entre les positions des k médianes donc que les échantillons proviennent de populations différentes et doivent être traités différemment les unes des autres. Il s'applique parfaitement bien à des données de type ordinal (semi-quantitatives) et est l'analogue d'un test de variance à un critère de classification destiné aux données quantitatives normales (gaussiennes). Il est préférable d'après Scherrer (1984) au test des médianes généralisé à k échantillons car il utilise beaucoup mieux l'information disponible. Ce test est aussi une généralisation du test précédemment décrit, le *test de Wilcoxon-Mann-Whitney*. Il permet de déterminer si les k sommes des rangs et non seulement si les deux sommes, se révèlent trop disparates pour que l'hypothèse nulle d'unicité des populations d'origine des échantillons soit retenue. La distribution de la variable auxiliaire obéit à une loi du  $\chi^2$  si les effectifs des échantillons sont assez grands. Il est donc important de considérer leur taille. Finalement rien ne ressort de particulier des Tableaux de résultats A2.3-6 et A2.3-7 qui puisse nous empêcher de conclure à une relativement bonne homogénéité de la réalité pollinique de la période 1994-2003. La seule hétérogénéité marquée provient de la station située

à l'Ouest avec un certain nombre de jours manquants durant deux années de mesure en septembre. Notons à ce propos qu'un certain nombre de données manquantes sont associées à des fins de saison plus précoces. Ainsi l'année 1995 est marquée à Ville Lasalle par une fin brutale des enregistrements à partir du 21 septembre. En revanche les autres données manquantes se distribuent tout à fait aléatoirement dans les séries de données. Concernant les stations de la RSQA, en 1997, 1999, 2000, 2001 et 2003 le comptage s'arrête le 28 août ce qui contribue à augmenter le nombre de données manquantes en plus de quelques journées par-ci par-là.

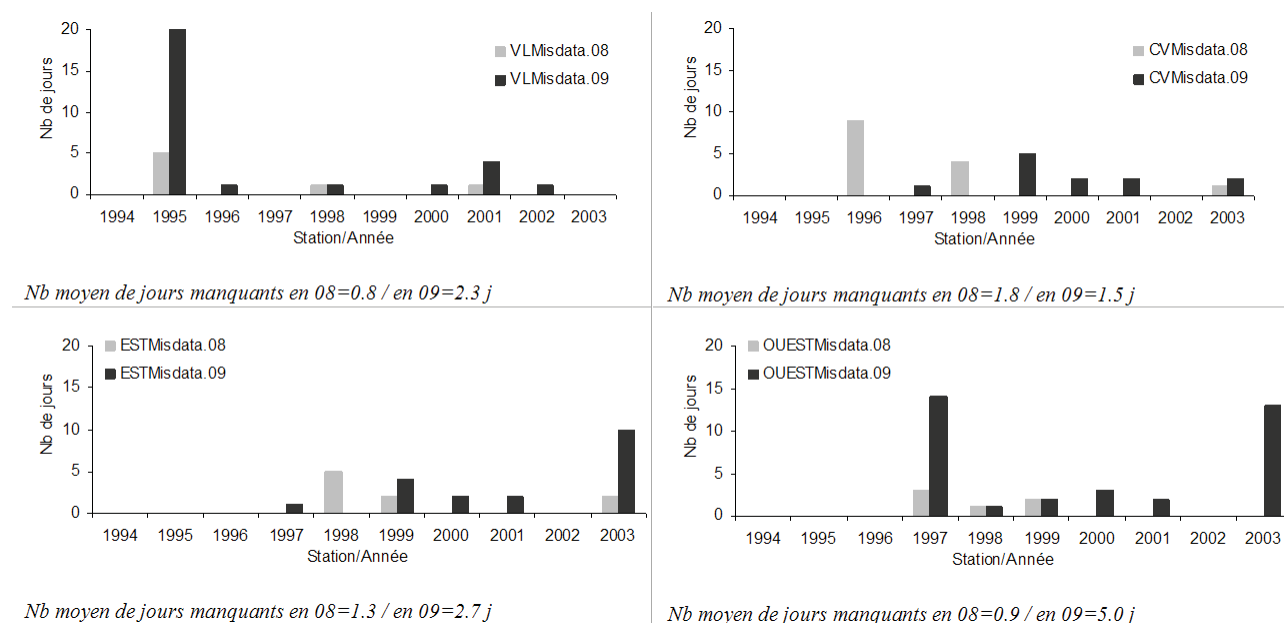


Figure A2.1-1 : Nombre de jours manquants par station

#### A2.1-2.2 Variabilité spatio-temporelle de la saison pollinique, du début et du pic majeur

D'année en année, la saison pollinique de l'ambrosie démarre t'elle au même moment ? En est-il de même d'une station de mesure à l'autre à l'occasion d'une même saison et le pic majeur a-t-il toujours lieu à peu près aussi, au même moment au cours la période de pollinisation ? Pour caractériser le début des saisons polliniques nous faisons référence de la règle des 3 jours successifs avec plus de 1 grains/m<sup>3</sup> d'air. Les Tableaux A2.1-1 à A2.1-4 fournissent les dates identifiées comme étant les débuts de saison, de même que celles de la fin des comptages. Dans le cas de Ville Lasalle, elle correspond probablement à la fin de la saison mais ce n'est probablement pas le cas des trois autres stations dont la fin de la saison est probablement amputé par l'arrêt des mesures. De ce fait, nous ne pouvons nous intéresser ni à la durée des saisons ni à leur fin. Les résultats laissent apparaître une variabilité tant dans le numéro de la semaine du début de la saison que dans celui du maximum. Le numéro de la semaine marquant le début de la saison pour une année donnée, varie-t-il d'une station de mesure à l'autre ? Il est ici question d'estimer la variabilité spatiale du début de la saison associée au fait d'avoir plusieurs sites de mesure localisés dans différents milieux.

Si le numéro de semaine varie de façon significative d'un site de mesure à l'autre au cours d'une même année, alors nous pouvons convenir du fait que le territoire à l'étude est suffisamment vaste pour entraîner la présence de conditions micro locales « sensibles » qui peuvent être de diverses natures (météorologiques, édaphiques, floristiques et/ou relevant de considérations géographiques ou encore du type d'occupation de l'espace donc de l'aménagement de l'environnement immédiat de la station).

Il est ensuite question d'évaluer la variabilité temporelle en nous demandant si le numéro de la semaine du début de la saison pollinique varie d'une année sur l'autre pour une station donnée ? Cette question devrait nous permettre d'identifier s'il y a des fluctuations dans le temps résultant de circonstances très particulières dans le cas d'un événement isolé tel un printemps très chaud ou inversement très froid, ou encore si à plus long terme certaines tendances se dessinent que nous pouvons mettre en relation avec des tendances déjà observées pour certains paramètres météorologiques et potentiellement attribuables à des changements du climat.

Ouest	Début de la saison			Maximum		Fin des mesures	Total de grains
	Date	Jour julien	N° semaine	Jour julien	N° semaine		
1997	01.août	213	31	237	35	25.sept	3'279
1998	30.juillet	211	31	239	35	30.sept	5'932
1999	24.juillet	205	29	240	34	28.sept	9'523
2000	26.juillet	207	30	238	34	27.sept	9'906
2001	24.juillet	205	30	253	37	28.sept	8'619
2002	28.juillet	209	31	246	36	30.sept	4'089
2003	23.juillet	205	30	235	34	28.sept	6'071

Tableau A2.1-1 : Situation pollinique dans l'Ouest de 1997 à 2002

Ville Lasalle	Début de la saison			Maximum		Fin des mesures	Total de grains
	Date	Jour julien	N°semaine	Jour julien	N°semaine		
1994	10.août	222	32	239	34	30.sept	1'800
1995	01.août	213	31	231	33	20.sept	2'056
1996	03.août	215	31	236	34	13.oct	1'979
1997	31.juillet	212	31	245	36	13.oct	1'710
1998	28.juillet	209	31	240	35	30.sept	3'080
1999	24.juillet	205	29	237	34	11.oct	2'701
2000	30.juillet	211	30	241	35	11.oct	2'375
2001	29.juillet	210	30	250	36	07.oct	3'531
2002	01.août	213	31	244	35	31.oct	4'910

Tableau A2.1-2 : Situation pollinique à Ville Lasalle de 1994 à 2002

Centre Ville	Début de la saison			Maximum		Fin des mesures	Total de grains
	Date	Jour julien	N°semaine	Jour julien			
1996	02.août	214	31	239	35	11.oct	2'867
1997	31.juillet	212	31	245	36	29.sept	2'955
1998	03.août	215	32	242	35	30.sept	3'094
1999	29.juillet	210	30	247	35	28.sept	3'628
2000	30.juillet	211	30	241	35	28.sept	3'133
2001	01.août	213	31	238	34	28.sept	3'518
2002	02.août	214	31	246	36	30.sept	1'214
2003	02.août	214	31	234	34	28.sept	2'081

Tableau A2.1-3 : Situation pollinique au Centre Ville de 1996 à 2003

Est	Début de la saison			Maximum		Fin des mesures	Total de grains
	Date	Jour julien	N°semaine	Jour julien	Date		
1997	03.août	215	31	249	36	29.sept	4'366
1998	23.juillet	204	30	240	35	30.sept	3'765
1999	24.juillet	205	29	240	34	28.sept	3'906
2000	02.août	214	31	239	34	28.sept	3'899
2001	02.août	214	31	238	34	28.sept	3'902
2002	31.juillet	212	31	246	35	30.sept	1'465
2003	04.août	216	32	246	35	28.sept	2'206

Tableau A2.1-4: Situation pollinique dans l'Est de 1997 à 2002

Les mêmes questions se posent ensuite à propos de la semaine du pic majeur de la saison. Si aucune différence sensible n'apparaît, ce sera signe que peu importe le début de la saison, il y a des phénomènes régulateurs qui font que l'émission maximale a invariablement lieu durant la même période de l'année. Si ce n'est pas le cas, alors soit on observe une régularité du nombre de semaines qui suit le début de la saison et l'on attribue ceci à une forme de régularité phénologique ; soit ce nombre de semaines est tout à fait variable, alors les conditions météorologiques du moment sont déterminantes. Si maintenant pour un même site, la date du maximum de la saison varie d'année en année, on peut soit noter une tendance particulière, soit aucune.

Il est possible de visualiser le tout à la Figure A2.1-2. Le comportement de chaque station y est répertorié par année en terme de semaines (colonne de gauche) et de jours (colonne de droite). Il est possible de remarquer que la semaine

marquant le début moyen de la saison est la 30.6<sup>ième</sup> (A1). Nous remarquons dès lors que les années 1995, 1996, 1997 et plus ou moins 1998, 2002, 2003 et encore moins 2000 se situent autour de cette moyenne. L'année 1999 est quant à elle particulièrement précoce puisque démarrant au cours de la 29<sup>ième</sup> semaine dans 3 stations et une semaine plus tard au centre-ville. L'écart interannuel le plus grand est de 3 semaines (de 29 à 32). En terme de dates (A2), il semble y avoir une certaine concordance entre stations deux à deux, à savoir VL avec la station Ouest et CV avec celle de l'Est. Enfin la station Ouest semble avoir tendance à se montrer de façon générale plus précoce que la station de l'Est. Concernant la semaine du pic (B1), la semaine moyenne se trouve être proche de la 35<sup>ième</sup>. Il y a ici un peu plus d'hétérogénéité que précédemment. On ne retrouve pas de façon aussi claire la co-variation que nous avons préalablement établie entre les stations VL et Ouest toutefois visible en 1998, 1999 et jusqu'à un certain point en 2001. Remarquons que jusqu'en 1999, plus la saison a commencé tard, plus le pic est atteint tardivement. Ensuite ce n'est plus nécessairement le cas. En 2001, cette tendance est même complètement inversée. Les deux sites les plus précoces, Est et VL, atteignent les maxima très tardivement au cours de la 36<sup>ième</sup> et 37<sup>ième</sup> semaine respectivement.

Le test de Kruskal-Wallis, test de comparaison pour k échantillons indépendants (Tableau A2.3-7) est appliqué pour contrôler les observations préalables. Comme nous pouvons le noter dans le Tableau A2.3-16, à toutes les questions la plupart des réponses aux tests sont négatives, c'est-à-dire que l'on accepte l'hypothèse nulle d'appartenance à la même population d'origine. Notons cependant qu'à la première série de question, concernant la semaine marquant le démarrage de la saison pollinique d'ambrosie, le test effectué sur la période 1997-2002 et concernant les 3 stations CV, Est et Ouest, démontre une différence significative de même que celui effectué sur la période 1997-2003 avec les 4 stations abstraction faite de VL en 2003. Des tests de comparaisons multiples qui ont été effectués, font ressortir 3 paires significativement différentes les unes des autres à savoir, 1999/1997, 1999/1998 et 1999/2002. Dans tous les cas, l'année 1999 est toujours présente. Il faudra identifier ce qui a bien pu initier cette distinction. Considérant le début de la saison, les conditions météorologiques du printemps sont probablement déterminantes. La consultation des Tableaux (Tableau A2.1-1 à A2.1-4) permet de remarquer que l'année 1999 se distingue des autres par la précocité de sa saison pollinique comparativement à d'autres années nettement plus « tardives » telles 1995, 1996, 1997, 1998, 2003 et dans une moindre mesure 2002.

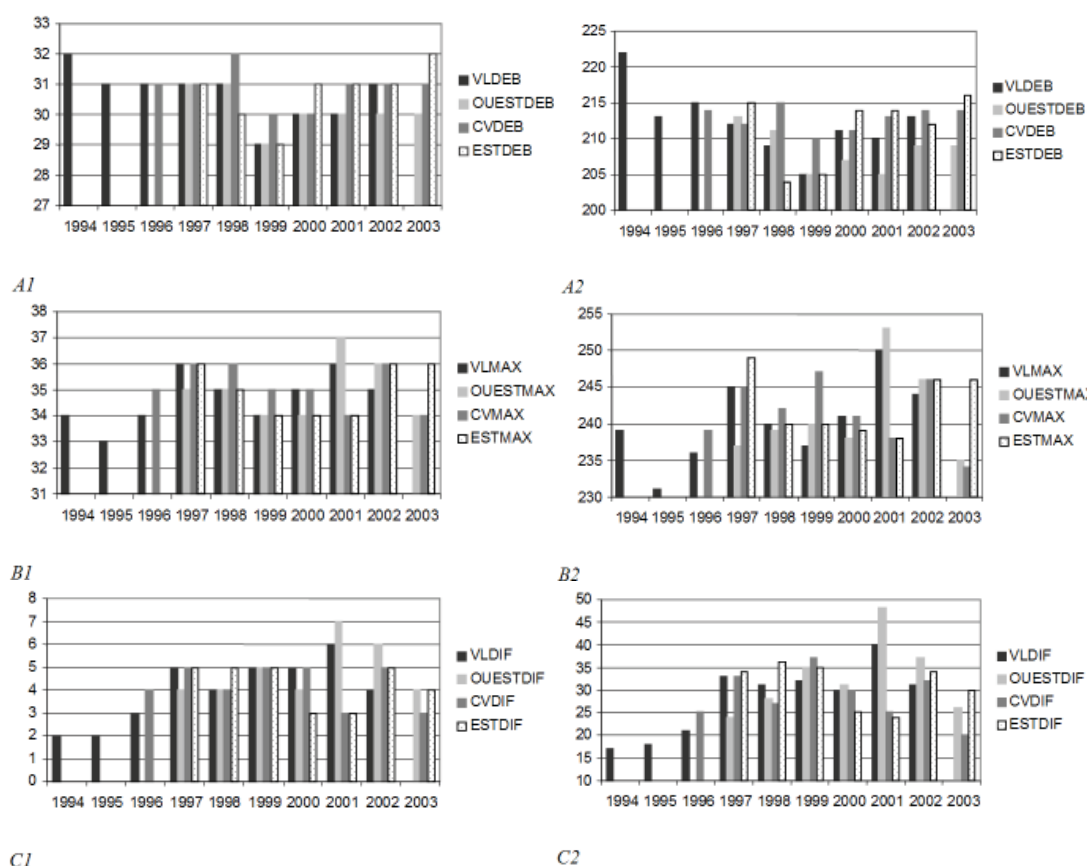


Figure A2.1-2 : Comportement de chaque station en termes de semaines (colonne de gauche) et en terme de jours (colonne de droite). A correspond au Début, B au maximum et C à la différence entre maximum et début de la saison



La transcription aux Figures A2.1-3 et A2.1-4 de l'évolution de la semaine marquant le début de la saison et de celle du pic permet de montrer qu'à partir de l'année 1999 les conditions sont favorables à une pollinisation plus hâtive et généralisée sur l'ensemble du territoire à l'étude (Figure A2.1-3), la station Ouest étant encore plus hâtive (Tableau A2.1-1). En revanche, les stations CV et Est sont celles qui montrent le moins de signes de précocité. Existe-t-il un gradient d'Ouest en Est qui justifie cette distribution spatiale ? Dans tous les cas de Figure nous confirmons la précocité générale du début de la saison pollinique en 1999 (de façon générale 2 semaines plus tôt qu'en 1998). En ce qui concerne le maximum de pollens, nous pouvons remarquer dans un premier temps que la précocité de la saison n'induit pas de façon réellement explicite de précocité du pic. En effet en 1999, le pic a certes lieu partout une semaine plus tôt qu'en 1998 mais il s'agit d'une année manifestement particulière. En termes de nombre de semaines des différents débuts et pics, 1999 et 2002 sont les deux années les plus extrêmes à l'inverse de 1994, 1995 et 2003. Le site Ouest est quant à lui celui de tous les écarts (précocité des démarrages et relative tardivité des pics). Le site VL tend à se comporter de façon similaire à celui de l'Ouest. Les sites Est et CV semblent aussi s'accorder entre eux avec des comportements beaucoup moins extrêmes que les précédents. La Figure A2.1-4 confirme ces tendances. Tel qu'attendu, les deux colonnes co-varient deux par deux. Les stations VL et Ouest montrent une tendance semblable et assez forte à la croissance avec le temps du nombre de semaines ou de jours entre les prémices de la saison et le maximum alors que la tendance est plutôt inversée au CV et à l'est avec vers une diminution du nombre de jours.

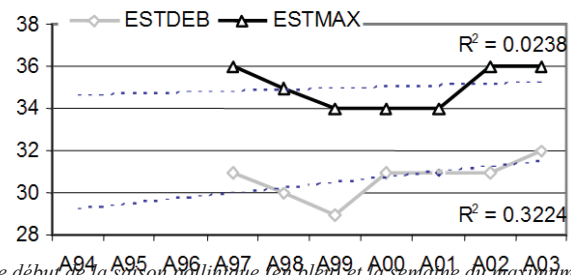
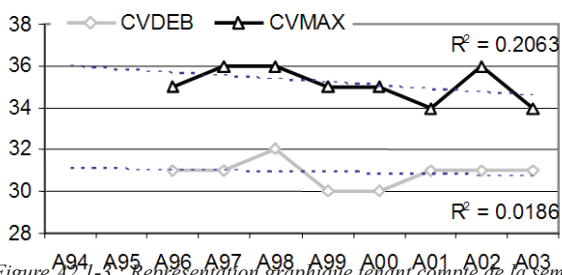
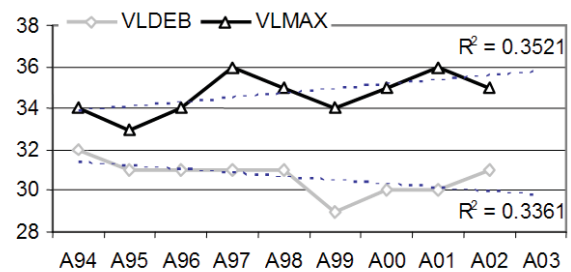
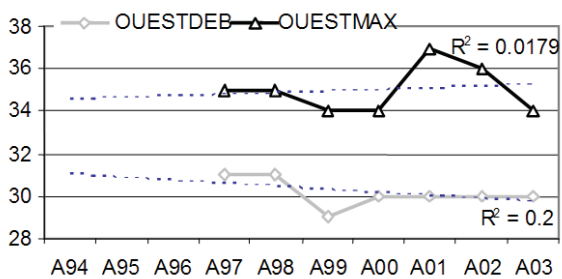


Figure A2.1-3 : Représentation graphique tenant compte de la semaine marquant le début de la saison pollinique (en bleu) et la semaine du maximum (en rouge) à chacune des stations de mesure

Globalement, il est possible de dire que les échantillons disponibles présentent des comportements relativement semblables d'une station de mesure à l'autre au fil du temps. Le temps ne semble donc pas être un indicateur suffisamment sensible pour permettre de caractériser des différences significatives de comportement soit d'une station de mesure à l'autre soit d'une année sur l'autre. L'échantillon disponible dont nous disposons est par ailleurs trop petit. En d'autres mots, il existe des disparités d'un point de mesure à un autre lorsque l'on considère la grande région de Montréal mais aucune situation n'est significativement différente d'une autre. L'appartenance à un même milieu géographique, même aussi vaste que peut l'être l'île de Montréal, fait que la saison pollinique de l'ambrosie est assez homogène où que l'on soit et quelque soit l'année considérée.

Si la saison pollinique ne montre dans le temps que peu de fluctuations, qu'advient-il des quantités de pollens mesurées en ces sites au cours de ces dix années ? La moindre libération de pollen par une source contribue à la genèse un nuage pollinique qui, une fois pris en charge par l'atmosphère tend, avec le temps et la distance, à accroître son volume de dispersion donc à diminuer sa concentration et parvient ainsi à une certaine homogénéisation de son contenu, à l'échelle d'une région (Gregory, 1973). Par ailleurs, la largeur du nuage à sa source est largement dépendante des caractéristiques de celle-ci (Eversmeyer *et al.*, 1987). De plus, il est su que plus la source est limitée dans l'espace, moins elle a d'impact sur les concentrations polliniques régionales puisque d'après Harrington (1965), Janssen (1966) et Gregory (1973) seuls 10% du contenu émis à la source sont encore aéroportés à une distance de 4 fois le diamètre de cette source. Nous ne

savons comment contribuent chacun des 4 sites étudiés à ce nuage ou quelle part ils en représentent. La prochaine section se consacre à la description des 10 saisons polliniques.

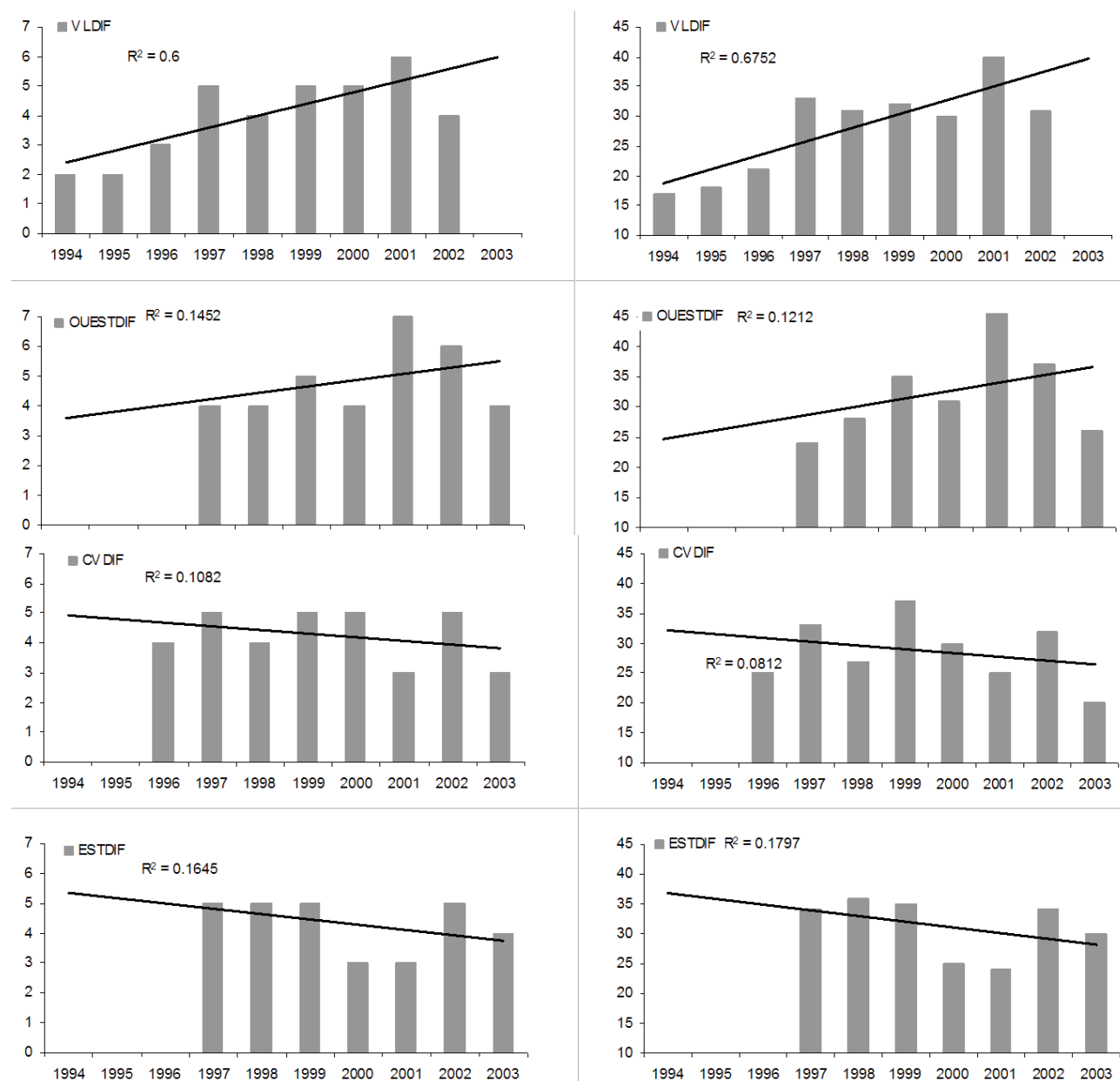


Figure A2.1-4 : Nombre de semaines et nombre de jours par station, par année.

## ANNEXE 2.2 – DESCRIPTION DES CAPTEURS DE POLLEN

### A2.2-1 Modèle de capteur GRIPST-2000 (station Ville Lasalle)

Ce capteur est employé par la compagnie Aerobiology research laboratories (<http://www.pollenplus.com/main.html>). Il s'agit d'un échantillonneur de récolte synchronisé non sélectif. Il a été conçu principalement pour la recherche d'aéroallergènes. Cet échantillonneur a une enveloppe imperméable à l'eau appropriée à tous les types de temps extrême et un moteur résistant. Le poteau de support de tête d'échantillonnage est de un pouce et demi de long pour réduire la turbulence de l'air et pour optimiser la récolte du pollen et des spores. Le poteau est fabriqué par ordinateur pour en assurer l'équilibre et pour réduire l'usure du moteur. Il incorpore également un minuteur de relais à semi-conducteurs, réglé à un taux de 10% d'échantillonnage. La synchronisation des intervalles peut être ajustée. Le contact d'essai (Test) est monté sur l'extérieur de l'échantillonneur pour permettre l'accès facile. Ces dispositifs se sont avérés efficaces pour récolter les échantillons aussi petits que 2 à 3 microns et ils sont donc appropriés pour récolter des grains de pollen et des spores fongiques.

La tête de prélèvement a été conçue pour soutenir deux tiges de polystyrène claires et démontables. Ces tiges ont une surface de prélèvement de 1,59 millimètre par 32 millimètres. Quand l'échantillonneur est au repos, les tiges se rétractent à l'intérieur de la tête de prélèvement. En utilisant approximativement une énergie de 12 volts, le moteur fait tourner la tête de prélèvement à une vitesse de rotation de 2400 tours par minute. La force centrifuge fait alors prolonger les tiges en bas à un angle de 90°. Les particules présentes dans l'air seront alors captées par les tiges. La quantité de particules accumulées sur les tiges est fonction du volume d'air prélevé. Ceci dépend de la taille des tiges, de la vitesse de rotation et de la durée du temps d'exposition. Afin de maintenir ces particules, les tiges doivent être enduites d'une substance visqueuse qui tient compte de l'examen microscopique sous la lumière visible. Nous recommandons une graisse de silicone spécifique pour enduire les tiges. De l'hexane devrait être employé comme solvant. On ne recommande pas d'enduire les tiges de silicone juste avec les doigts. Ce n'est pas un procédé sûr et la couche de silicone ne sera pas uniforme sur les tiges.

Parfois, il est nécessaire de recueillir des échantillons sur de longues périodes de temps. Ceci pose un problème de surcharge de particules sur la tige. S'il y a trop de particules sur les tiges, il deviendra difficile, voire impossible, de faire une identification précise. Lorsque de longues périodes d'échantillonnage sont nécessaires, on recommande d'échantillonner de façon cyclique. Les modèles GRIPST 2000 est équipé d'un dispositif de prélèvement avec une minuterie. La minuterie actionne la tête de prélèvement de façon intermittente. Quand l'échantillonneur est au repos, les tiges sont rétractées à l'intérieur de la tête pour empêcher les particules d'atteindre la tige. Les professionnels qui étudient les aéroallergènes emploient souvent ces modèles pour récolter des échantillons sur des périodes de 24 heures. Avec ces modèles, ils peuvent produire les comptes qui sont précis et représentatifs de la période de temps voulue. Quand le prélèvement est complet, les tiges de polystyrène démontables peuvent être placées dans un adaptateur cannelé spécial pour l'examen sous le microscope.

### A2.2-2 Capteur volumétrique de type Hirst Burkard (autres stations)

Ce type de capteur est employé par la Ville de Montréal (<http://www.rsqa.qc.ca/ps02rsqf.htm>). Description de l'appareillage et du protocole d'après le site : <http://www.air-lr.asso.fr/publications/fichiers/248.pdf>, consulté en avril 2006. L'appareil de Hirst est une pompe électrique monté sur une girouette qui prélève par une buse de 14 mm X 2 mm un volume d'air constant (10 l / min). Les particules aspirées sont piégées sur une lame de microscope enduite de vaseline qui défile verticalement à raison de 2 mm/heure. Dans la version plus moderne de Hirst, soit Lanzoni (<http://www.lanzoni.it/>), soit Burkard (<http://www.burkard.co.uk/7dayst.htm>) selon le fabricant, la lame est remplacée par une pièce cylindrique, appelée tambour, qui permet de réaliser un prélèvement durant une période de 7 jours. Les grains de pollen aspirés par le capteur, toujours au rythme de 10 l / min, sont projetés sur une bande de cellophane rendue adhésive. Cette bande de 19 mm de largeur est fixée sur le tambour qui défile devant la buse d'aspiration du capteur grâce à un mécanisme d'horlogerie à une vitesse de 2 mm / h. La buse d'aspiration de 28 mm<sup>2</sup> de surface utile (2 X 14 mm) est orientée face aux vents dominants à l'aide d'un empennage. Après une semaine de fonctionnement la bande est découpée en 7 segments qui correspondent à chaque jour de la semaine. Chacun d'entre eux est monté dans un milieu de montage solide entre lame et lamelle et analysé directement au microscope photonique (sans aucun traitement préalable).

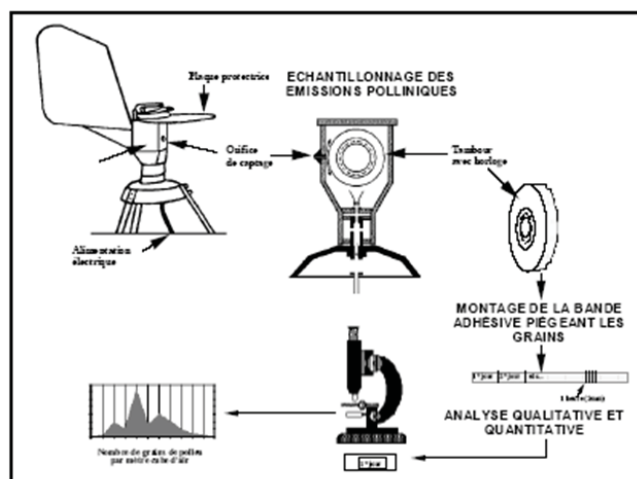


A)



B)

Figure A2.2 -1 : Capteur volumétrique de type Hirst manufacturé par Burkard (a) ou Lanzoni (b)



Méthode Hirst



Echantillon monté entre lame et lamelle



Buse d'aspiration



Tambour

Figure A2.2 -2 : Protocole expérimental (a) et montage de lame microscopique (b) Source : <http://www.air-lr.asso.fr/publications/fichiers/248.pdf>

ANNEXE 2.3 : RÉSULTATS DES TESTS STATISTIQUES, TABLES ET AUTRES DONNÉES

A2.3-1 Règles de décisions relatives aux tests statistiques employés

Hypothèses		Nombre de différences non nulles	Rejet de H0 si
Principale $H_0$	Alternatives $H_1$		
$P(x_{i1} > x_{i2}) = 0.5$  Egalité des deux distributions d'origine	$P(x_{i1} > x_{i2}) \neq 0.5$ Inégalité des distributions d'origine	$n > 60$	$ Z_{Tobs}  \geq Z_{\alpha/2}$ ou $ Z_{Tcor}  \geq Z_{\alpha/2}$
	Test bilatéral	$n \leq 60$	$T_{obs} < T_{\alpha/2}$
	$P(x_{i1} > x_{i2}) > 0.5$ Distribution de la population 1 est décalée vers les grandes valeurs	$n > 60$	$ Z_{Tobs}  \geq Z_{\alpha}$ ou $ Z_{Tcor}  \geq Z_{\alpha}$
	$P(x_{i1} > x_{i2}) < 0.5$ Distribution de la population 1 est décalée vers les petites valeurs Test bilatéral	$n \leq 60$	$T_{obs} < T_{\alpha}$

Tableau A2.3-1 : Règles de décision relatives au test de Wilcoxon pour échantillons appariés. D'après Scherrer, 1984

Hypothèses		Taille des échantillons	Rejet de H0 si
Principale $H_0$	Alternative $H_1$		
$P(x_{i1} > x_{j2}) = 0.5$  Egalité des deux distributions d'origine	$P(x_{i1} > x_{j2}) \neq 0.5$  Inégalité des deux échantillons	$n_1$ et $n_2 \leq 8$	$2P(U_{obs.}) \leq \alpha$
		$9 \leq n_1$ ou $n_2 \leq 20$	$U_{obs.} \leq U_{\alpha}$
		$n_1$ ou $n_2 > 20$	$ Z_{obs.}  \geq Z_{\alpha/2}$

Tableau A2.3-2 : Règles de décisions relatives à un test bilatéral de Wilcoxon-Mann-Whitney. Adapté d'après Sherrer, 1984

Hypothèses		Effectifs et nombre d'échantillons	Rejet de H0 si
Principale $H_0$	Alternative $H_1$		
groupe d'échantillons homogène	groupe d'échantillons hétérogène	$n_1, n_2, \text{ et } n_3 \leq 5$ et $k < 4$	$H_c \geq H_{\alpha}$ ou $H_{cor.} \geq H_{\alpha}$
		$n_1, n_2, \text{ et } n_3 > 5$ ou $k > 3$	$H_{cor.} \geq \chi^2_{\alpha/(k-1)}$ ou $H_c \geq \chi^2_{\alpha/(k-1)}$

Tableau A2.3-3 : Règles de décisions relatives à un test de Kruskal-Wallis. Adapté d'après Sherrer, 1984



Hypothèses		Taille des échantillons	Rejet de $H_0$ si
Principale $H_0$ : le groupe d'échantillons est homogène	Alternative $H_1$ : le groupe d'échantillons est non homogène	$n > 30$	$ Z_{rs}  \geq Z_{\alpha/2}$
		$n \leq 30$	$ Z_{rs}  \geq r_{s \alpha/2}$

Tableau A2.3-4 : Règles de décisions relatives au coefficient de corrélation de rang de Spearman  $r_s$ . D'après Scherrer, 1984

## A2.3-2 Résultats de tests

Année	Station	Paramètres du test Anderson-Darling	Résultat et interprétation	
			P	Interprétation
1994	VL	$A^2 = 5.872$	$P < 0.0001$	Au seuil de signification $\alpha=0.05$ on peut rejeter $H_0$ selon laquelle l'échantillon suit une loi normale. Autrement dit, la non normalité est
1995	VL	$A^2 = 2.644$	$P < 0.0001$	idem
1996	VL	$A^2 = 3.576$	$P < 0.0001$	idem
	CV	$A^2 = 3.625$	$P < 0.0001$	idem
1997	VL	$A^2 = 2.306$	$P < 0.0001$	idem
	CV	$A^2 = 2.249$	$P < 0.0001$	idem
	OUEST	$A^2 = 2.861$	$P < 0.0001$	idem
	RP	$A^2 = 2.644$	$P < 0.0001$	idem
1998	VL	$A^2 = 3.302$	$P < 0.0001$	idem
	CV	$A^2 = 4.349$	$P < 0.0001$	idem
	OUEST	$A^2 = 3.738$	$P < 0.0001$	idem
	EST	$A^2 = 4.978$	$P < 0.0001$	idem
1999	VL	$A^2 = 3.111$	$P < 0.0001$	idem
	CV	$A^2 = 2.404$	$P < 0.0001$	idem
	OUEST	$A^2 = 3.828$	$P < 0.0001$	idem
	RP	$A^2 = 2.995$	$P < 0.0001$	idem
2000	VL	$A^2 = 4.447$	$P < 0.0001$	idem
	CV	$A^2 = 4.314$	$P < 0.0001$	idem
	OUEST	$A^2 = 5.258$	$P < 0.0001$	idem
	EST	$A^2 = 5.872$	$P < 0.0001$	idem
2001	VL	$A^2 = 4.440$	$P < 0.0001$	idem
	CV	$A^2 = 4.703$	$P < 0.0001$	idem
	OUEST	$A^2 = 2.521$	$P < 0.0001$	idem
	EST	$A^2 = 3.471$	$P < 0.0001$	idem
2002	VL	$A^2 = 4.984$	$P < 0.0001$	idem
	CV	$A^2 = 3.184$	$P < 0.0001$	idem
	OUEST	$A^2 = 3.308$	$P < 0.0001$	idem
	EST	$A^2 = 4.114$	$P < 0.0001$	idem
2003	CV	$A^2 = 3.248$	$P < 0.0001$	idem
	OUEST	$A^2 = 2.235$	$P < 0.0001$	idem
	RP	$A^2 = 5.602$	$P < 0.0001$	idem

Tableau A2.3-5 : Résultats du test de normalité Anderson-Darling, pour  $\alpha=0.05$ , unilatéral selon XLSTAT (VL : Ville Lasalle, CV : Centre Ville, RP : Rivière des Prairies ou Est, SA : Sainte Anne ou Ouest)

Questions	Résultats	Interprétation
Observons-nous une différence significative entre le nombre de journées manquantes en août de celles du mois de septembre, d'année en année dans l'Ouest ?	$n = 7$	Au seuil de signification $\alpha = 0.050$ on peut rejeter l'hypothèse selon laquelle les échantillons ne sont pas différents. Autrement dit, la différence entre les échantillons est significative.
	$T_{obs.} = 0$	
	$T_{\alpha/2} = 2$	
	$p\text{-valeur bilatérale} = 0.048$	
	$\alpha = 0.05$	
Observons-nous une différence significative entre le nombre de journées manquantes en août de celles du mois de septembre, d'année en année à la station VL ?	$n = 9$	Au seuil de signification $\alpha = 0.050$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse selon laquelle les échantillons ne sont pas différents. Autrement dit, la différence entre les échantillons n'est pas significative.
	$T_{obs.} = 5.5$	
	$T_{\alpha/2} = 5$	
	$p\text{-valeur bilatérale} = 0.085$	
	$\alpha = 0.05$	
Observons-nous une différence significative entre le nombre de journées manquantes en août de celles du mois de septembre, d'année en année au CV ?	$n = 8$	Au seuil de signification $\alpha = 0.050$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse selon laquelle les échantillons ne sont pas différents. Autrement dit, la différence entre les échantillons n'est pas significative.
	$T_{obs.} = 14$	
	$T_{\alpha/2} = 3$	
	$p\text{-valeur bilatérale} = 0.622$	
	$\alpha = 0.05$	
Observons-nous une différence significative entre le nombre de journées manquantes en août de celles du mois de septembre, d'année en année dans l'Est ?	$n = 7$	Au seuil de signification $\alpha = 0.050$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse selon laquelle les échantillons ne sont pas différents. Autrement dit, la différence entre les échantillons n'est pas significative.
	$T_{obs.} = 6$	
	$T_{\alpha/2} = 0$	
	$p\text{-valeur bilatérale} = 0.200$	
	$\alpha = 0.05$	

Tableau A2.3-6 : Résultats issus du test bilatéral de Wilcoxon

Question	Résultats pour $\alpha = 0.05$	Interprétation
Entre 1996 et 2002, le nombre de jours manquants est-il significativement différent en août aux stations CV et VL ?	$U = 22.500$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les échantillons ne sont pas différents. Autrement dit, la différence entre les échantillons n'est pas significative.
	$U$ (espérance) = 24.500	
	$U$ (variance) = 38.904	
	$Z$ (valeur observée) = -0.321	
	$Z$ (valeur critique) = 1.960	
	$p\text{-valeur bilatérale} = 0.748$	
Entre 1996 et 2002, le nombre de jours manquants est-il significativement différent en septembre aux stations CV et VL ?	$U = 21.000$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les échantillons ne sont pas différents. Autrement dit, la différence entre les échantillons n'est pas significative.
	$U$ (espérance) = 24.500	
	$U$ (variance) = 55.058	
	$Z$ (valeur observée) = -0.472	
	$Z$ (valeur critique) = 1.960	
	$p\text{-valeur bilatérale} = 0.637$	
Entre 1996 et 2002, le nombre de jours manquants est-il significativement différent durant la saison pollinique aux stations CV et VL ?	$U = 11.500$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.
	$U$ (espérance) = 24.500	
	$U$ (variance) = 57.750	
	$Z$ (valeur observée) = -1.711	
	$Z$ (valeur critique) = 1.960	
	$p\text{-valeur bilatérale} = 0.087$	

Tableau A2.3-7 : Résultats du test U de Wilcoxon-Mann-Whitney

Question	Résultats	Interprétation
Entre 1997 et 2003, le nombre de jours manquants est-il significativement différent en août de la station CV à celle de l'Est et celle de l'Ouest ?	$H$ (valeur observée) = 1.180	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.
	$H$ (valeur critique) = 7.815	
	Degré de liberté = 3	
	$p\text{-valeur unilatérale} = 0.758$	
	$\alpha = 0.05$	
Entre 1997 et 2003, le nombre de jours manquants est-il significativement différent en septembre de la station CV à celle de l'Est et celle de l'Ouest ?	$H$ (valeur observée) = 2.435	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.
	$H$ (valeur critique) = 7.815	
	Degré de liberté = 3	
	$p\text{-valeur unilatérale} = 0.487$	
	$\alpha = 0.05$	
Entre 1997 et 2003, le nombre de jours manquants est-il significativement différent durant la saison pollinique au complet de la station CV à celle de l'Est et celle de l'Ouest ?	$H$ (valeur observée) = 3.348	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.
	$H$ (valeur critique) = 7.815	
	Degré de liberté = 3	
	$p\text{-valeur unilatérale} = 0.341$	
	$\alpha = 0.05$	

Tableau A2.3-8 : Résultats du test de Kruskal-Wallis

Question : D'année en année, la semaine marquant le début de la saison est-elle significativement différente?	Résultats	Interprétation
1- de 1996 à 1997 stations VL et CV	$U = 2.000$ $U$ (espérance) = 2.000 $U$ (variance) = 0.000 $Z$ (valeur observée) = 0.000 $Z$ (valeur critique) = 1.96 $p$ -value bilatérale = 1.000 $\alpha = 0.05$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les échantillons ne sont pas différents. Autrement dit, la différence entre les échantillons n'est pas significative.
2- de 1997 à 2002 stations VL, CV, OUEST et EST	$H$ (valeur observée) = 13.163 $H$ (valeur critique) = 11.070 Degré de liberté = 5 $p$ -value unilatérale = 0.022 $\alpha = 0.05$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 6 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est significative.
3- de 1997 à 2003 stations VL, CV, OUEST et EST	$H$ (valeur observée) = 13.371 $H$ (valeur critique) = 12.592 Degré de liberté = 6 $p$ -value unilatérale = 0.038 $\alpha = 0.05$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 7 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est significative.
4- de 1997 à 2003 stations CV, OUEST et EST	$H$ (valeur observée) = 8.752 $H$ (valeur critique) = 12.592 Degré de liberté = 6 $p$ -value unilatérale = 0.188 $\alpha = 0.05$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 7 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.
Question : D'année en année, la semaine marquant le maximum de la saison est-elle différente?	Résultats	Interprétation
1- de 1996 à 1997 stations VL et CV	$U = 0.000$ $U$ (espérance) = 2.000 $U$ (variance) = 1.500 $Z$ (valeur observée) = -1.633 $Z$ (valeur critique) = 1.96 $p$ -value bilatérale = 0.102 $\alpha = 0.05$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les échantillons ne sont pas différents. Autrement dit, la différence entre les échantillons n'est pas significative.
2- de 1997 à 2002 stations VL, CV, OUEST et EST	$H$ (valeur observée) = 10.423 $H$ (valeur critique) = 11.070 Degré de liberté = 5 $p$ -value unilatérale = 0.064 $\alpha = 0.05$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 6 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.
3- de 1997 à 2003 stations CV, OUEST et EST	$H$ (valeur observée) = 8.696 $H$ (valeur critique) = 12.592 Degré de liberté = 6 $p$ -value unilatérale = 0.191 $\alpha = 0.05$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 7 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.
Question : D'année en année, le nombre de semaines séparant le début de la saison du pic est-il différent?	Résultats	Interprétation
1- de 1996 à 1997 stations VL et CV	$U = 0.000$ $U$ (espérance) = 2.000 $U$ (variance) = 1.500 $Z$ (valeur observée) = -1.633 $Z$ (valeur critique) = 1.96 $p$ -value bilatérale = 0.102 $\alpha = 0.05$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les échantillons ne sont pas différents. Autrement dit, la différence entre les échantillons n'est pas significative.
2- de 1997 à 2002 stations VL, CV, OUEST et EST	$H$ (valeur observée) = 3.428 $H$ (valeur critique) = 11.070 Degré de liberté = 5 $p$ -value unilatérale = 0.634 $\alpha = 0.05$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 6 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.
3- de 1997 à 2003 stations CV, OUEST et EST	$H$ (valeur observée) = 7.908 $H$ (valeur critique) = 12.592 Degré de liberté = 6 $p$ -value unilatérale = 0.245 $\alpha = 0.05$	Au seuil de signification $\alpha = 0.05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 7 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.

Tableau A2.3-9: Résultats de tests de Kruskal-Wallis réalisés sur les semaines du début de la saison et du pic pollinique de 1996 à 2003 (1994 et 1995 ne sont pas considérées du fait qu'un seul site n'a fonctionné au cours de ces années là).

Question: Durant une année donnée les comptes polliniques se comportent-ils de la même manière d'une station à l'autre ?	Résultats	Interprétation
Toutes années confondues	H (valeur observée) = 168.684 H (valeur critique) = 43.773 Degré de liberté = 30 p-valeur unilatérale < 0.001	Au seuil de signification $\alpha = 0.010$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 31 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.
Année 1996	U = 1295.000 U (espérance) = 1560.000 U (variance) = 29370.087 Z (valeur observée) = -1.546 Z (valeur critique) = 1.960 p-valeur bilatérale = 0.122	Au seuil de signification $\alpha = 0.050$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle selon laquelle les échantillons ne sont pas différents. Autrement dit, la différence entre les échantillons n'est pas significative.
Année 1997	H (valeur observée) = 16.699 H (valeur critique) = 7.815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0.001	Au seuil de signification $\alpha = 0.010$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.
Année 1998	H (valeur observée) = 4.343 H (valeur critique) = 7.815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0.227	Au seuil de signification $\alpha = 0.050$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.
Année 1999	H (valeur observée) = 19.602 H (valeur critique) = 7.815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0.000	Au seuil de signification $\alpha = 0.010$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.
Année 2000	H (valeur observée) = 20.393 H (valeur critique) = 7.815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0.000	Au seuil de signification $\alpha = 0.010$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.
Année 2001	H (valeur observée) = 21.251 H (valeur critique) = 7.815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0.000	Au seuil de signification $\alpha = 0.010$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.
Année 2002	H (valeur observée) = 26.895 H (valeur critique) = 7.815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0.000	Au seuil de signification $\alpha = 0.010$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.
Année 2003	H (valeur observée) = 7.273 H (valeur critique) = 5.991 Degré de liberté = 2 p-valeur unilatérale = 0.026	Au seuil de signification $\alpha = 0.050$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes, ce qui n'est pas le cas au seuil $\alpha = 0.01$ . Autrement dit, la différence entre les groupes est significative mais pas hautement significative.

Tableau A2.3-10 : Résultats des tests de Mann-Whitney en 1996 et Kruskal-Wallis de 1997 à 2003

	OUEST	VL	CV
CV96		<b>0.875</b>	
VL97	<b>0.746</b>		
CV97	<b>0.835</b>	<b>0.757</b>	
EST97	<b>0.882</b>	<b>0.702</b>	<b>0.895</b>
VL98	<b>0.868</b>		
CV98	<b>0.899</b>	<b>0.864</b>	
EST98	<b>0.809</b>	<b>0.722</b>	<b>0.807</b>
VL99	<b>0.819</b>		
CV99	<b>0.914</b>	<b>0.898</b>	
EST99	<b>0.882</b>	<b>0.834</b>	<b>0.895</b>
VL00	<b>0.837</b>		
CV00	<b>0.865</b>	<b>0.864</b>	
EST00	<b>0.896</b>	<b>0.778</b>	<b>0.900</b>
VL01	<b>0.729</b>		
CV01	<b>0.755</b>	<b>0.826</b>	
EST01	<b>0.666</b>	<b>0.692</b>	<b>0.737</b>
VL02	<b>0.802</b>		
CV02	<b>0.833</b>	<b>0.677</b>	
EST02	<b>0.879</b>	<b>0.750</b>	<b>0.864</b>
CV03	<b>0.872</b>		
EST03	<b>0.823</b>	<b>0.740</b>	

Tableau A2.3-11 : Résultats des corrélations inter stations de Spearman effectuées chaque année afin de valider ou non la co-variation des concentrations de pollen d'une station avec une autre au cours d'une même année. Les valeurs en gras sont significatives au seuil  $\alpha = 0.05$

Question : Durant une année donnée les comptes polliniques quelle est ou quelles sont les stations dont le comportement est significativement différent des autres ?	Résultats pour $\alpha = 0.05$ avec correction de Bonferroni pour le niveau de significativité global	Interprétation
Année 1997	Valeur critique pour la différence = 31.951	CV97 et EST97 ne sont pas significativement différentes l'une de l'autre. OUEST97 et EST97 ne le sont pas non plus mais montrent toutefois une tendance à la différence. VL97 se comporte de façon significativement différente des autres stations
Année 1998	Valeur critique pour la différence = 34.060	Ouest98 n'est pas significativement différente de Est98 mais l'est de VL98 et CV98 qui ne le sont pas en revanche avec EST98.
Année 1999	Valeur critique pour la différence = 34.399	CV99 et EST99 se comportent de façon semblable tout comme VL99 et OUEST99 entre elles.
Année 2000	Valeur critique pour la différence = 36.366	La station Ouest00 se comporte de façon significativement différente des trois autres stations qui ne montrent pas de différences les unes par rapport aux autres.
Année 2001	Valeur critique pour la différence = 36.366	La station Ouest01 se comporte de façon significativement différente des trois autres stations qui ne montrent pas de différences les unes par rapport aux autres.
Année 2002	Valeur critique pour la différence = 37.311	CV99 et EST99 se comportent de façon semblable tout comme VL99 et OUEST99.
Année 2003	Valeur critique pour la différence = 24.648	N'ayant que trois stations qui fonctionnent cette année-là, nous ne pouvons parler de paires mais on retrouve l'association des années 2002, 2001, 2000 et dans une certaine mesure 1998 à savoir d'un côté la station Ouest02 et de l'autre CV02/Est02

Tableau A2.3-12 : Résultats des tests de comparaisons multiples pour les années 1997 à 2003 (CF Xlstat)

Question : En un site de mesure donné, les comptes polliniques sont-ils semblables d'année en année ?	Résultats pour $\alpha = 0.05$	Interprétation
OUEST : Sainte Anne de Bellevue 1997-2003	H (valeur observée) = 16.607 H (valeur critique) = 12.592 ddl = 6 p-value unilatérale = 0.011	Au seuil de signification $\alpha = 0.050$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 7 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est significative mais pas fortement significative.
VL : Ville Lasalle 1994-2002	H (valeur observée) = 28.916 H (valeur critique) = 15.507 ddl = 8 p-value unilatérale = 0.000	Au seuil de signification $\alpha = 0.010$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 9 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.
CV : Centre ville 1996-2003	H (valeur observée) = 23.568 H (valeur critique) = 14.067 ddl = 7 p-value unilatérale = 0.001	Au seuil de signification $\alpha = 0.010$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 8 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.
EST : Rivières des Prairies 1997-2003	H (valeur observée) = 18.991 H (valeur critique) = 12.592 ddl = 6 p-value unilatérale = 0.004	Au seuil de signification $\alpha = 0.010$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 7 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.

Tableau A2.3-13 : Résultats des tests Kruskal-Wallis pour échantillons indépendants

OUEST	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
1997				1.000						
1998				<b>0.718</b>	1.000					
1999				0.140	0.445	1.000				
2000				<b>0.580</b>	<b>0.694</b>	<b>0.657</b>	1.000			
2001				0.510	<b>0.662</b>	0.545	<b>0.846</b>	1.000		
2002				0.448	<b>0.732</b>	<b>0.743</b>	<b>0.753</b>	<b>0.739</b>	1.000	
2003				<b>0.748</b>	<b>0.855</b>	0.573	<b>0.636</b>	0.559	<b>0.778</b>	1.000

Ville Lasalle	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
1994	1.000									
1995	0.559	1.000								
1996	<b>0.587</b>	<b>0.678</b>	1.000							
1997	0.506	<b>0.680</b>	<b>0.729</b>	1.000						
1998	<b>0.698</b>	<b>0.608</b>	<b>0.860</b>	<b>0.687</b>	1.000					
1999	<b>0.660</b>	<b>0.743</b>	<b>0.743</b>	<b>0.705</b>	<b>0.757</b>	1.000				
2000	<b>0.577</b>	<b>0.671</b>	<b>0.811</b>	<b>0.743</b>	<b>0.643</b>	<b>0.771</b>	1.000			
2001	<b>0.634</b>	0.455	0.552	<b>0.792</b>	0.497	0.504	<b>0.769</b>	1.000		
2002	<b>0.899</b>	<b>0.658</b>	<b>0.687</b>	0.560	<b>0.781</b>	<b>0.704</b>	<b>0.739</b>	<b>0.711</b>	1.000	

Centre Ville	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
1996			1.000							
1997			<b>0.720</b>	1.000						
1998			<b>0.729</b>	<b>0.834</b>	1.000					
1999			0.557	<b>0.613</b>	<b>0.644</b>	1.000				
2000			0.427	0.559	0.434	<b>0.872</b>	1.000			
2001			0.421	<b>0.674</b>	0.460	0.376	0.333	1.000		
2002			<b>0.585</b>	0.497	0.526	<b>0.919</b>	<b>0.802</b>	0.503	1.000	
2003			0.561	<b>0.646</b>	<b>0.782</b>	<b>0.694</b>	0.568	0.498	<b>0.692</b>	1.000

EST	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
1997				1.000						
1998				<b>0.694</b>	1.000					
1999				0.074	0.561	1.000				
2000				<b>0.648</b>	0.565	0.491	1.000			
2001				<b>0.650</b>	<b>0.609</b>	0.550	<b>0.928</b>	1.000		
2002				0.357	0.556	<b>0.788</b>	<b>0.856</b>	<b>0.879</b>	1.000	
2003				<b>0.888</b>	<b>0.801</b>	0.427	<b>0.722</b>	<b>0.800</b>	<b>0.582</b>	1.000

Tableau A2.3-14 : Résultats des corrélations inter annuelles de Spearman effectuées en chacune des quatre stations afin de valider ou non la co-variation des concentrations de pollen d'une année sur l'autre. Les valeurs en gras sont significatives au seuil  $\alpha = 0.05$



Question : En une station de mesure donnée, quelle est ou quelles sont les années significativement différentes des autres ?	Résultats pour $\alpha = 0,05$ avec correction de Bonferroni pour le niveau de significativité global	Interprétation
OUEST : Sainte Anne de Bellevue 1997-2003	Valeur critique pour la différence = 54,120	2001 est différente de l'année 1997 ainsi que de 2002 qui est elle-même différente de 2000.
VL : Ville Lasalle 1994-2002	Valeur critique pour la différence = 74,290	1994 est différente de 1995, 1998, 2001 et 2002. 1995 est différente de 1997. 1996 l'est de 2002 comme le sont 1999 et 1997 qui est elle-même différente de 2001.
CV : Centre ville 1996-2003	Valeur critique pour la différence = 72,589	2002 est différente de 1996, 1997, 1999 et 2001. 2003 l'est de 1997, 1999 et 2001.
EST : Rivières des Prairies 1997-2003	Valeur critique pour la différence = 60,863	2002 est significativement différente de 1997, 1998, 1999, 2000 et 2001.

Tableau A2.3-15 : Résultats des tests de comparaisons multiples pour les sites (cf. XLSTAT)

Question : En une station de mesure donnée, quelle est ou quelles sont les années significativement différentes des autres ?	Résultats pour $\alpha = 0,05$ avec correction de Bonferroni pour le niveau de significativité global	Interprétation
OUEST : Sainte Anne de Bellevue 1997-2002	Valeur critique pour la différence = 49,115	2001 est différente de l'année 1997, 1998 et 2002.
VL : Ville Lasalle 1997-2002	Valeur critique pour la différence = 57,067	1997 est différente de 1998, 2001 et 2002 qui est elle-même différente de 1999 et 2000.
CV : Centre ville 1997-2002	Valeur critique pour la différence = 56,000	2002 est différente de 1997, 1998, 1999, 2000 et 2001.
EST : Rivières des Prairies 1997-2002	Valeur critique pour la différence = 55,439	2002 est différente de 1997, 1998, 1999, 2000 et 2001.

Tableau A2.3-16 : Résultats des tests de comparaisons multiples pour les sites (cf. XLSTAT)

Question : La distribution moyenne des fréquence d'occurrence de journées se situant au-delà de valeurs annuelles données de percentiles, varie t'elle de station en station ?	Résultats pour $\alpha = 0,05$	Interprétation
Moyenne 1997-2002	H (valeur observée) = 0,058 H (valeur critique) = 7,815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0,996	Au seuil de signification $\alpha = 0,05$ on ne peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative.
Nb j > 99% entre 1997 et 2002	H (valeur observée) = 14,967 H (valeur critique) = 7,815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0,002	Au seuil de signification $\alpha = 0,01$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.
95% < Nb j ≤ 99% entre 1997 et 2002	H (valeur observée) = 10,665 H (valeur critique) = 7,815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0,014	Au seuil de signification $\alpha = 0,05$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est significative.
90% < Nb j ≤ 95% entre 1997 et 2002	H (valeur observée) = 6,811 H (valeur critique) = 7,815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0,078	Au seuil de signification $\alpha = 0,05$ on ne peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative mais il existe une tendance à la différence.
75% < Nb j ≤ 90% entre 1997 et 2002	H (valeur observée) = 10,732 H (valeur critique) = 7,815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0,013	Au seuil de signification $\alpha = 0,05$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est significative.
50% < Nb j ≤ 75% entre 1997 et 2002	H (valeur observée) = 7,399 H (valeur critique) = 7,815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0,06	Au seuil de signification $\alpha = 0,05$ on ne peut pas rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes n'est pas significative mais il existe une tendance à la différence.
25% < Nb j ≤ 50% entre 1997 et 2002	H (valeur observée) = 8,502 H (valeur critique) = 7,815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0,037	Au seuil de signification $\alpha = 0,05$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est significative.
Nb j ≤ 25% entre 1997 et 2002	H (valeur observée) = 11,383 H (valeur critique) = 7,815 Degré de liberté = 3 p-valeur unilatérale = 0,01	Au seuil de signification $\alpha = 0,01$ on peut rejeter l'hypothèse nulle d'absence de différence entre les 4 groupes. Autrement dit, la différence entre les groupes est hautement significative.

Tableau A2.3-17 : Résultats des tests de Kruskal-Wallis effectués afin de comparaison les distributions relatives des journées se trouvant au-delà d'une valeur de percentile annuelle d'une station à l'autre

## A2.3-3 Autres données diverses

STATION OUEST	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
total 08.09	3279	5932	9523	9906	8619	4089	6071
moyenne 08.09	75	101	167	171	146	67	126
maximum 08.09	402	523	1010	1053	569	291	581
25 percentile 08.09	14.2	10.5	18.5	28.3	33	12.1	17.9
50 percentile 08.09	46.7	37	84.3	74.6	78.2	41.8	57.3
75 percentile 08.09	89.8	167	209.6	207.9	246.8	105.5	183.7
90 percentile 08.09	180.3	241.8	426	477.2	348.7	170.1	389.7
Ecart-type 08.09	84.3	115.6	218	226.6	136.6	72.6	150.1
CV 08.09	1.1	1.1	1.3	1.3	0.9	1.1	1.2
Asymétrie 08.09	2	1.4	2.1	2.1	1	1.4	1.4
Aplatissement 08.09	4.9	2.1	4.7	4.4	0.4	1.4	1
total 08	1994	3941	6118	6385	4712	2280	4728
moyenne 08	71	131	211	206	152	74	153
maximum 08	402	523	1010	1053	359	238	581
25 percentile 08	14.2	17.3	19.9	41.6	65.3	20.1	10.3
50 percentile 08	54.3	137	149.4	82	145	72.1	109.2
75 percentile 08	89.8	177.3	252.8	316.6	234.2	108.2	253.8
90 percentile 08	152.1	245.2	508.9	511.8	322.7	164	390.7
Ecart-type 08	84	125	246.3	264.9	109.9	61.7	165.2
CV 08	1.2	1	1.2	1.3	0.7	0.8	1.1
Asymétrie 08	2.5	1.2	1.8	1.9	0.6	0.8	1
Aplatissement 08	8.2	2.1	3.3	3.2	-0.8	0.1	-0.1
total 09	1285	1991	3405	3521	3907	1809	1343
moyenne 09	80	69	122	130	140	60	79
maximum 09	292	336	826	659	570	291	461
25 percentile 09	16.9	9	12.7	12.7	18.2	5.5	31.2
50 percentile 09	41	28	60.7	65.1	52.4	27.3	49.4
75 percentile 09	94.7	74	115.8	155.7	265.6	67.8	77.3
90 percentile 09	213.4	241	341.4	358.4	355.2	185.9	129.8
Ecart-type 09	87.3	96.9	177.2	168.8	162.9	82.8	106.3
CV 09	1.1	1.4	1.5	1.3	1.2	1.4	1.3
Asymétrie 09	1.5	1.8	2.7	2	1.2	1.8	3.3
Aplatissement 09	1.3	2	8.7	3.6	0.4	2.2	11.6

Tableau A2.3-18 : Station Ouest

STATION EST	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
total 08.09	4366	3765	3906	3899	3902	1465	2206
moyenne 08.09	73	67	71	66	66	24	45
maximum 08.09	313	377	285	434	273	109	134
25 percentile 08.09	8.4	9.8	10.4	10.6	9.5	5.3	9.9
50 percentile 08.09	42	30	32.7	31.9	36.4	14.4	42.5
75 percentile 08.09	117.1	81	116.9	74.8	103.3	31.2	69.9
90 percentile 08.09	171.9	181.5	178.3	193.6	161.9	53.7	92.3
Ecart-type 08.09	78	85.4	77.1	90.8	73.2	26.7	36.1
CV 08.09	1.1	1.3	1.1	1.4	1.1	1.1	0.8
Asymétrie 08.09	1.2	1.8	1.2	2.1	1.4	1.7	0.4
Aplatissement 08.09	0.7	3.1	0.4	4.6	1.2	2.6	-0.6
total 08	2340	2743	2662	2159	2298	778	1199
moyenne 08	75	106	92	70	74	25	41
maximum 08	230	377	285	434	273	93	127
25 percentile 08	8.6	16.3	12	11.8	19.7	6.5	1.4
50 percentile 08	49.4	65	91.9	35.7	53.9	22.6	39.1
75 percentile 08	139.2	174	159.5	78.6	103.3	34.2	72.1
90 percentile 08	170.2	239	189.2	154.9	161.7	51.4	92.3
Ecart-type 08	72.7	107.1	82.4	92.4	74.7	22.6	38.7
CV 08	1	1	0.9	1.3	1	0.9	0.9
Asymétrie 08	0.6	1	0.6	2.5	1.4	1.2	0.4
Aplatissement 08	-1	0.2	-0.7	7.4	1.5	1.5	-1.1
total 09	2026	1022	1245	1740	1604	687	1008
moyenne 09	70	34	48	62	57	23	50
maximum 09	313	187	274	314	251	109	134
25 percentile 09	8.4	8.3	7.8	9.8	8.7	4.7	24.7
50 percentile 09	32.7	21.5	26.6	20.1	17.5	9.9	49.7
75 percentile 09	96.6	41	48.2	60.9	94.3	19.7	67
90 percentile 09	183.9	68.8	122.2	237.4	150.3	69.6	80.2
Ecart-type 09	84.5	38.7	64.6	90.6	71.8	30.7	32.2
CV 09	1.2	1.1	1.4	1.5	1.3	1.3	0.6
Asymétrie 09	1.7	2.6	2.3	1.9	1.4	2	0.8
Aplatissement 09	2	8	5.6	2.3	1.2	2.9	0.9

Tableau A2.3-20: Station Est

STATION VL	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002
total 08.09	1800	2056	1954	1680	3058	2650	2350	3425	4832
moyenne 08.09	30	50	33	28	51	43	39	60	81
maximum 08.09	204	204	209	141	246	233	254	312	379
25 percentile 08.09	3.2	12.9	4.3	4	11.6	4.6	7.5	12.5	10.5
50 percentile 08.09	16	33.4	16.7	16.2	28.7	27.5	17.7	29.6	38.3
75 percentile 08.09	36.3	63.6	48	36.7	72.1	61.5	57.5	78.6	111.2
90 percentile 08.09	64	116.5	77.7	63.8	129	108.3	106.8	140.4	213.8
Ecart-type 08.09	42	50.7	39.5	30.9	54.8	52.9	49.2	71	99.5
CV 08.09	1.4	1	1.2	1.1	1.1	1.2	1.3	1.2	1.2
Asymétrie 08.09	2.5	1.6	2.1	1.8	1.5	1.8	2.2	1.8	1.6
Aplatissement 08.09	7	2.1	6.1	3.4	2	3.2	5.9	3	1.6
total 08	1191	1414	1392	821	2118	1693	1589	1785	2645
moyenne 08	38	54	45	26	71	55	51	60	85
maximum 08	204	204	209	126	246	233	254	247	283
25 percentile 08	0	10.8	10.8	5	21.9	4.6	9.1	16.2	11.4
50 percentile 08	21.3	38.8	38.8	21.8	59.3	38.8	21.7	45.3	59.3
75 percentile 08	43.7	73.9	66.9	37.8	110	75.7	69.5	87.2	127.9
90 percentile 08	133.4	116	92.8	62.2	152.7	135.7	115.1	126.6	205.2
Ecart-type 08	53.8	54.4	47.1	27.5	61.4	60.8	60	57.1	87.8
CV 08	1.4	1	1	1	0.9	1.1	1.2	1	1
Asymétrie 08	1.9	1.5	1.8	1.8	1.1	1.5	1.8	1.5	1.1
Aplatissement 08	3.2	1.8	3.9	4.5	0.9	1.9	3.3	2.5	0.3
total 09	609	642	562	859	940	957	761	1639	2187
moyenne 09	20	43	19	29	31	32	26	61	75
maximum 09	95	167	78	141	169	185	123	312	379
25 percentile 09	4.3	16.7	3.2	4.2	9.7	3.4	5.7	10.3	8
50 percentile 09	11.7	25.9	6.5	14.4	15.7	14.2	12.5	23.9	17.1
75 percentile 09	32.8	48	28	29.6	33.5	39.6	36.5	54.8	80.7
90 percentile 09	45.3	96	59.8	79.4	84.8	65.7	61.1	201.7	232.4
Ecart-type 09	21.9	44.4	23.9	34.5	39.3	41.3	30.1	84.9	112
CV 09	1.1	1	1.2	1.2	1.3	1.3	1.1	1.4	1.5
Asymétrie 09	1.7	2.1	1.4	1.8	2.3	2.3	1.8	1.9	1.8
Aplatissement 09	3.5	4	0.8	2.9	5.2	6.1	2.9	2.5	2.4

Tableau A2.3-19 : Station Ville Lasalle

STATION CV	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
total 08.09	2867	2955	3094	3628	3133	3518	1214	2081
moyenne 08.09	55	49	54	65	53	60	20	36
maximum 08.09	263	180	264	317	236	330	102	168
25 percentile 08.09	6.5	8.4	8	8.9	8	12.1	4.1	2.3
50 percentile 08.09	18	32	27	41.4	32.7	34.2	13.6	20.9
75 percentile 08.09	91	68.4	75	94.5	66.4	75.2	30.4	52.3
90 percentile 08.09	145.9	119	169.8	157.6	148.8	162.8	45	100
Ecart-type 08.09	65.7	50.8	65.3	71.7	62.5	71.8	21.9	39.5
CV 08.09	1.2	1	1.2	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1
Asymétrie 08.09	1.4	1.3	1.6	1.7	1.6	2	1.8	1.2
Aplatissement 08.09	1.2	0.7	1.7	2.9	1.8	3.9	3.7	1.1
total 08	1620	1580	2300	2284	1976	2096	631	1310
moyenne 08	74	51	85	74	64	68	20	44
maximum 08	263	174	264	317	236	330	56	168
25 percentile 08	10.4	10.9	15.5	5.7	9.1	15.9	7.5	2.8
50 percentile 08	58.5	42.1	75	51.6	32.7	53.2	18	35.7
75 percentile 08	104.6	73.2	129	112.4	86.6	75.2	30.8	69.6
90 percentile 08	152.6	117.2	194.8	177.7	201.2	139	42.7	103
Ecart-type 08	72.5	47.8	75	76.6	75.3	75.4	15.5	45.1
CV 08	1	0.9	0.9	1	1.2	1.1	0.8	1
Asymétrie 08	1.2	1.1	0.7	1.3	1.3	2.2	0.6	1.1
Aplatissement 08	1	0.8	-0.4	1.9	0.4	5.2	-0.7	0.5
total 09	1247	1374	794	1343	1157	1421	583	771
moyenne 09	42	47	26	54	41	51	19	28
maximum 09	213	180	213	291	147	242	102	104
25 percentile 09	6	8.6	7.3	15.9	4.5	7.4	2.5	2.3
50 percentile 09	12.4	26.5	16.5	30.4	31.2	17.8	8	15.5
75 percentile 09	47.1	39.9	30	66.8	57.6	64.4	23.7	47.2
90 percentile 09	134.2	125.6	44.2	118.3	101.4	171	56.3	80.2
Ecart-type 09	57.7	54.6	38.7	65	42.6	67.8	27.2	31.1
CV 09	1.4	1.2	1.5	1.2	1	1.3	1.4	1.1
Asymétrie 09	1.6	1.4	4.1	2.3	1.2	1.8	1.9	1.1
Aplatissement 09	1.6	1	19.7	6.7	0.8	2.1	3.1	0.1

Tableau A2.3-21 : Station Centre Ville

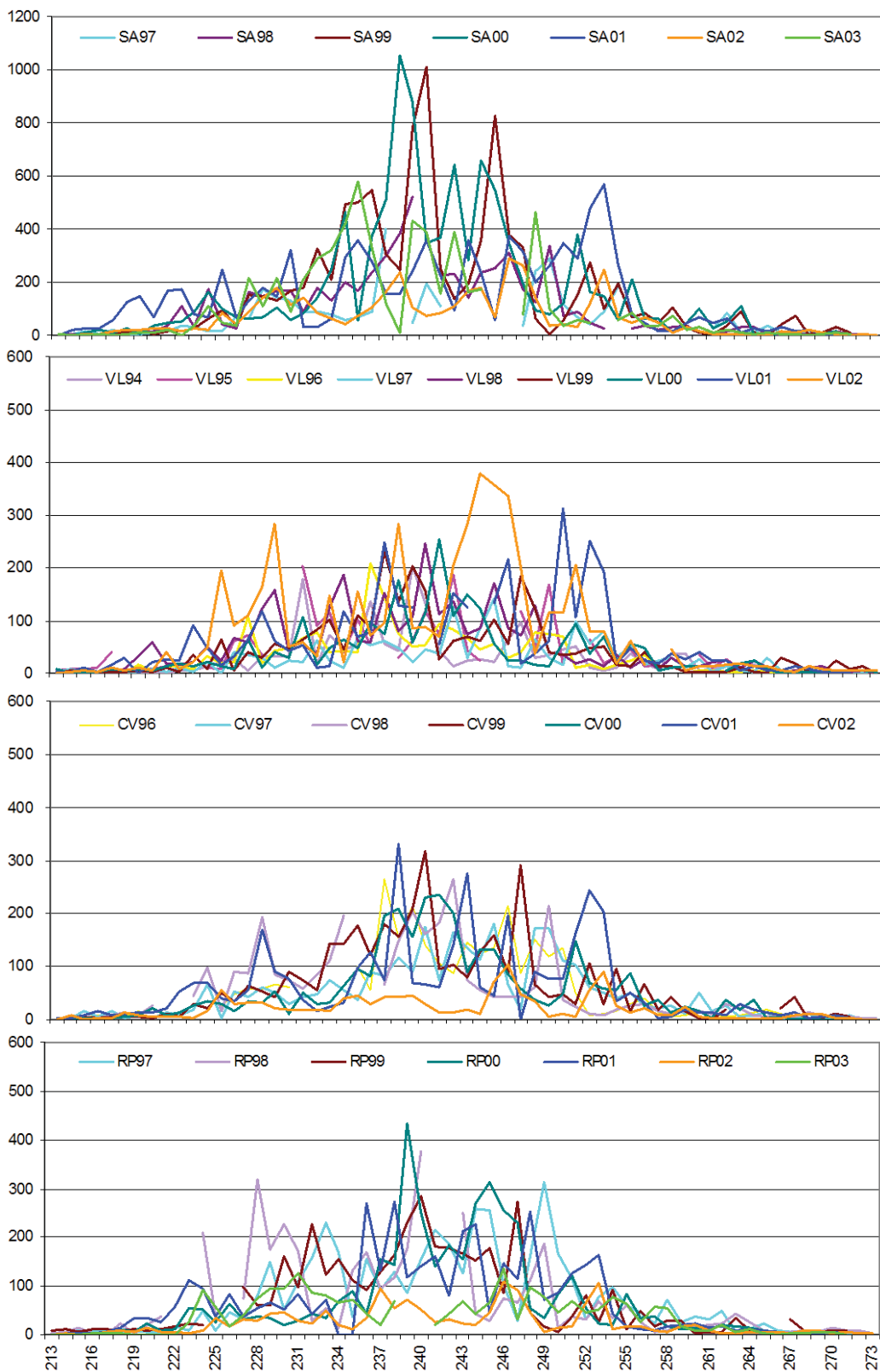


Figure A2.3-1 : Courbes saisonnières des concentrations d'ambrosie récoltées par station (RP : Est et SA : Ouest)

AVRIL	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	moyenne	normale
Tmax (°C)	10.4	9.3	9.8	10.3	13.6	12.4	9.4	12.2	11.9	9.2	10.8	10.7
Tmin (°C)	0.2	-1.8	0.3	-0.8	2.5	1.4	0.9	0.7	1.8	-0.7	0.5	0.7
Tmoy(°C)	12.2	13.3	12.3	10.7	17.4	16.4	13.3	15.4	11.3	13.4	5.7	5.7
MAI	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	moyenne	normale
Tmax (°C)	17.9	18.8	18	15.9	23.4	23	18.4	20.9	16.5	18.4	19.1	18.9
Tmin (°C)	6.4	7.7	6.5	5.4	11.5	9.6	8.4	9.8	6	8.4	8	7.6
Tmoy(°C)	5.3	3.8	5	4.8	8.1	6.9	5.2	6.5	6.9	4.2	13.6	13.3
JUIN	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	moyenne	normale
Tmax (°C)	24.7	26.4	23.6	26.1	23.8	26.4	21.9	25.4	22.5	24.2	24.5	23.3
Tmin (°C)	13.4	13.7	13.6	13.9	15.2	15.5	12.4	14.5	12.3	13.3	13.8	12.4
Tmoy(°C)	19	20.4	18.6	20	19.5	21	17.2	20	17.5	18.8	19.2	17.9
PRINTEMPS	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	moyenne	normale
Tmax (°C)	17.7	18.1	17.1	17.4	20.3	20.5	16.7	19.5	17	17.3	18.2	
Tmin (°C)	6.7	6.4	6.8	6.2	9.7	8.9	7.3	8.4	6.7	7	7.4	
Tmoy(°C)	12.2	12.3	12	11.8	15	14.8	12	13.9	11.9	12.2	12.8	

Tableau A2.3-22 : Valeurs moyennes des températures de printemps. Les normales saisonnières sont celles de la période 1971-2000 mesurées à l'aéroport international Pierre Eliot Trudeau de Montréal

JUILLET	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	moyenne	normale
Tmax (°C)	26.6	27.4	24.9	25.5	25.9	27.5	24.9	25.3	27.4	26.6	26.2	26.3
Tmin (°C)	16.9	16.9	15.4	15.6	16.2	17.7	15.3	15.1	16.8	16.6	16.2	15.5
Tmoy(°C)	21.8	22.1	20.2	20.6	21	22.6	20.1	20.2	22.1	21.6	21.2	20.9
AOUT	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	moyenne	normale
Tmax (°C)	23.5	26	26.1	23.7	26.1	25.3	24.6	28.5	27.6	26.2	25.8	24.7
Tmin (°C)	12.9	14.4	14.5	14.3	15.8	14.6	14.9	16.5	16.3	17	15.1	14.2
Tmoy(°C)	18.2	20.2	20.4	19	21	19.9	19.8	22.5	22	21.6	20.5	19.5
SEPTEMBRE	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	moyenne	normale
Tmax (°C)	19.8	19.4	21.1	19.3	21.1	23	19.2	22.2	24	22.7	21.2	19.5
Tmin (°C)	9.8	7.4	11.5	9.9	11.1	13.1	9.1	11.4	12.6	12.5	10.8	9.2
Tmoy(°C)	14.8	13.4	16.3	14.6	16.1	18.1	14.1	16.8	18.3	17.6	16	14.4
ETE	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	moyenne	normale
Tmax (°C)	23.3	24.2	24.1	22.8	24.4	25.3	22.9	25.3	26.3	25.2	24.4	23.5
Tmin (°C)	13.2	12.9	13.8	13.2	14.4	15.1	13.1	14.3	15.2	15.4	14.1	13
Tmoy(°C)	18.3	18.6	19	18.1	19.4	20.2	18	19.8	20.8	20.3	19.2	18.2

Tableau A2.3-23 : Valeurs moyennes des températures d'été. Les normales saisonnières sont celles de la période 1971-2000 mesurées à l'aéroport international Pierre Eliot Trudeau de Montréal

	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	moyenne	normale
AVRIL	53	46.4	46.4	54	103.6	70.8	45.2	67.7	99.4	63.4	65	69.2
MAI	222.8	240.9	226.4	177	385.5	331.7	241.3	321.3	196.4	260.8	260.4	257
JUIN	421.4	431.6	408.7	450.7	435.2	478.5	365.8	449.2	373.8	413.3	422.8	386.4
JUILLET	520.1	531	471.4	482.3	496.8	545.9	467.3	471.2	529.6	514	502.9	492
AOUT	409.9	470.3	476.1	435.1	495.5	462.9	458.5	543.5	525.5	513.5	479.1	449.6
SEPTEMBRE	294.7	249.9	340.3	287.9	332	392	274.6	354	398.3	379.2	330.3	280.9
SAISON	1921.8	1970	1969.3	1887	2248.5	2281.7	1852.7	2206.9	2123	2144	2060.5	1935.1
PRINTEMPS	697.2	718.9	681.5	681.7	924.3	881	652.3	838.2	669.6	737.4	748.2	712.6
ETE	1224.6	1251.1	1287.8	1205.3	1324.2	1400.7	1200.4	1368.7	1453.4	1406.6	1312.3	1222.5
ETE - PRTPS	527.4	532.2	606.3	523.6	399.9	519.7	548.1	530.5	783.8	669.2	564.1	509.9

Tableau A2.3-24 : Nombre de degrés jours de croissance au-dessus de 5°C accumulées au cours de chacun des mois d'avril à septembre de la 1994 à 2003 ainsi que normales et totaux et saisonniers. Les normales saisonnières sont celles de la période 1971-2000 mesurées à l'aéroport international Pierre Eliot Trudeau de Montréal



	TOTFIN04	MOY04	MAI	MOY05	TOTFIN05	JUN	MOY06	TOTFIN06	TOTPRTPS	NORMPRTPS	JUIL	NORM07	TOTFIN07	NORMFIN07	AOUT	NORM08	TOTFIN08	NORMFIN08	SEPT	NORM09	TOTFIN09	NORMFIN09
1989									744.9		517		1261.9		447.7		1709.6		318.9		2028.5	
1990									894.4		712.2		499.7		483.4		1194.1		1205.6		483.1	
1991									829.6		712.2		602.3		493.4		1332.1		1205.6		487.3	
1992									893.9		712.2		420.6		493.4		1114.5		1205.6		424.7	
1993									890.9		703.5		511.9		491.2		1202.8		1194.7		492.2	
1994	53	65	222.8	280.4	275.8	421.4	422.8	697.2	697.2		703.5		500.1		491.2		1217.3		1194.7		498.9	
1995	46.4	65	240.9	280.4	267.3	431.6	422.8	718.9	718.9		703.5		531		491.2		1249.9		1194.7		470.3	
1996	46.4	65	226.4	280.4	272.8	450.7	422.8	681.5	681.5		703.5		471.4		491.2		1152.9		1194.7		476.1	
1997	54	65	177	280.4	231	450.7	422.8	681.7	681.7		703.5		482.3		491.2		1164		1194.7		435.1	
1998	102.0	65	385.5	280.4	469.1	425.2	422.8	924.3	924.3		703.5		495.7		491.2		1421.1		1194.7		495.5	
1999	70.8	65	331.7	280.4	422.5	478.5	422.8	801	801		703.5		545.9		491.2		1429.9		1194.7		482.9	
2000	45.2	65	241.3	280.4	286.5	385.8	422.8	652.3	652.3		703.5		467.3		491.2		1119.6		1194.7		458.5	
2001	67.7	65	321.3	280.4	389	449.2	422.8	830.2	830.2		703.5		471.2		491.2		1309.4		1194.7		543.5	
2002	98.4	63	196.4	280.4	296.6	373.8	422.8	689.6	689.6		703.5		529.6		491.2		1189.2		1194.7		523.5	
2003	63.35	65	200.0	280.4	324.15	413.25	422.8	737.4	737.4		703.5		514		491.2		1251.4		1194.7		514.3	

Tableau A2.3-25 : Degrés jours de croissance au-dessus de 5°C accumulés à compter du 1<sup>er</sup> avril jusqu'à la fin septembre durant la période 1989 – 2003. Les normales saisonnières sont celles de la période 1971-2000 mesurées à l'aéroport international Pierre Eliot Trudeau de Montréal

AVRIL	MAI	JUN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	PRINTEMPS	ETE	SAISON GLOBALE
1998	1998	1999	1999	2001	2002	1998	2002	1999
2002	1999	1997	1995	2002	1999	1999	2003	1998
1999	2001	2001	2002	2003	2003	2001	1999	2001
normale	2003	1998	1994	1998	2001	moyenne	2001	2003
2001	moyenne	1995	2003	moyenne	1996	2003	1998	2002
2003	normale	moyenne	moyenne	1996	1998	1995	moyenne	moyenne
1997	2000	1994	1998	1995	moyenne	normale	1996	1995
moyenne	1995	2003	normale	1999	1994	1994	1995	1996
1994	1996	1996	1997	2000	1997	1997	1994	normale
1995	1994	normale	1996	normale	normale	1996	normale	1994
1996	2002	2002	2001	1997	2000	2002	1997	1997
2000	1997	2000	2000	1994	1995	2000	2000	2000

Tableau A2.3-26 : Classement par ordre décroissant des années à l'étude en fonction du nombre de degrés jours de croissance au-dessus de 5°C accumulées au cours de chaque mois ainsi que cumulées sur les saisons printanière, estivale et totale entre 1994 à 2003 en tenant compte de la place des normales et des moyennes. Les normales saisonnières sont celles de la période 1971-2000 mesurées à l'aéroport international Pierre Eliot Trudeau de Montréal

AVRIL	MAI	JUN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	PRINTEMPS	ETE	SAISON GLOBALE
	1999	1999	1999	2001	2002	1999	2002	1999
	1998	1995	2002	2002	1999	1998	1999	2001
	2001	1998	1995	2003	2001	2001	2003	2002
	moyenne	2001	1994	1998	2003	1995	2001	2003
	normale	1997	2003	moyenne	1996	moyenne	moyenne	1998
	2002	moyenne	moyenne	1996	moyenne	1994	1995	1995
	1994	1994	normale	1995	normale	1997	1998	moyenne
	1995	2003	1998	1999	1998	2003	1996	normale
	1996	normale	1997	normale	2000	normale	normale	1994
	2003	1996	2001	2000	1997	2002	1994	1996
	2000	2000	2000	1994	1995	1996	2000	2000
	1997	2002	1996	1997	1994	2000	1997	1997

Tableau A2.3-27 : Classement par ordre décroissant des années à l'étude en fonction du nombre de degrés jours de réfrigération au-dessus de 18°C accumulées au cours de chaque mois ainsi que cumulées sur les saisons printanière, estivale et totale entre 1994 à 2003 en tenant compte de la place des normales et des moyennes. Les normales saisonnières sont celles de la période 1971-2000 mesurées à l'aéroport international Pierre Eliot Trudeau de Montréal



AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	PRINTEMPS	ETE	SAISON GLOBALE
1999	1999	1997	2002	2002	2002	1999	2002	2001
1995	1996	1995	2001	2001	2001	1995	2001	1999
2001	1998	1999	2003	1999	2003	2001	2003	2002
1998	1997	2000	2000	1998	1995	1997	1995	1995
moyenne	2001	2001	1998	1995	moyenne	moyenne	1998	moyenne
1997	moyenne	moyenne	moyenne	moyenne	1998	1998	moyenne	1998
2002	1994	2002	1995	1996	2000	2002	1999	1997
2000	1995	1994	1999	2003	1999	1994	2000	2000
1994	2002	1996	1997	1997	1994	1996	1996	1994
1996	2000	1998	1994	2000	1996	2000	1997	1996
2003	2003	2003	1996	1994	1997	2003	1994	2003
normale	normale	normale	normale	normale	normale	normale	normale	normale

Tableau A2.3-28 : Classement par ordre croissant de l'humidité relative minimale moyenne mensuelle ainsi que saisonnière entre 1994 à 2003 en tenant compte de la place des normales et des moyennes de la période à l'étude. Les années les plus sèches se trouvent en tête de liste. Les normales saisonnières sont celles de la période 1971-2000 mesurées à l'aéroport international Pierre Eliot Trudeau de Montréal

AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOUT	SEPTEMBRE	PRINTEMPS	ETE	SAISON GLOBALE
1996	2000	1998	1996	1996	1997	2000	1996	2002
2002	1997	2000	1995	1997	1996	1996	1997	2001
1994	1995	1996	1997	1994	1999	2002	1999	2000
1997	2002	2002	1999	1995	1998	1994	1998	1999
2000	1994	1994	1998	1999	2003	1998	1995	1997
1995	1998	1999	1994	2000	1995	1997	1994	1996
1998	1996	2001	2000	1998	1994	1995	2000	1998
moyenne	moyenne	1997	2003	2003	2000	2001	2003	moyenne
1999	2001	moyenne	moyenne	2001	moyenne	moyenne	moyenne	1995
2001	1999	1995	2002	moyenne	2001	1999	2001	1994
normale	normale	normale	2001	2002	2002	normale	2002	normale
			normale	normale	normale		normale	

Tableau A2.3-29 : Classement par ordre décroissant de l'humidité relative maximale moyenne mensuelle ainsi que saisonnière entre 1994 à 2003 en tenant compte de la place des normales et des moyennes de la période à l'étude. Les années les plus humides se trouvent en tête de liste. Les normales saisonnières sont celles de la période 1971-2000 mesurées à l'aéroport international Pierre Eliot Trudeau de Montréal

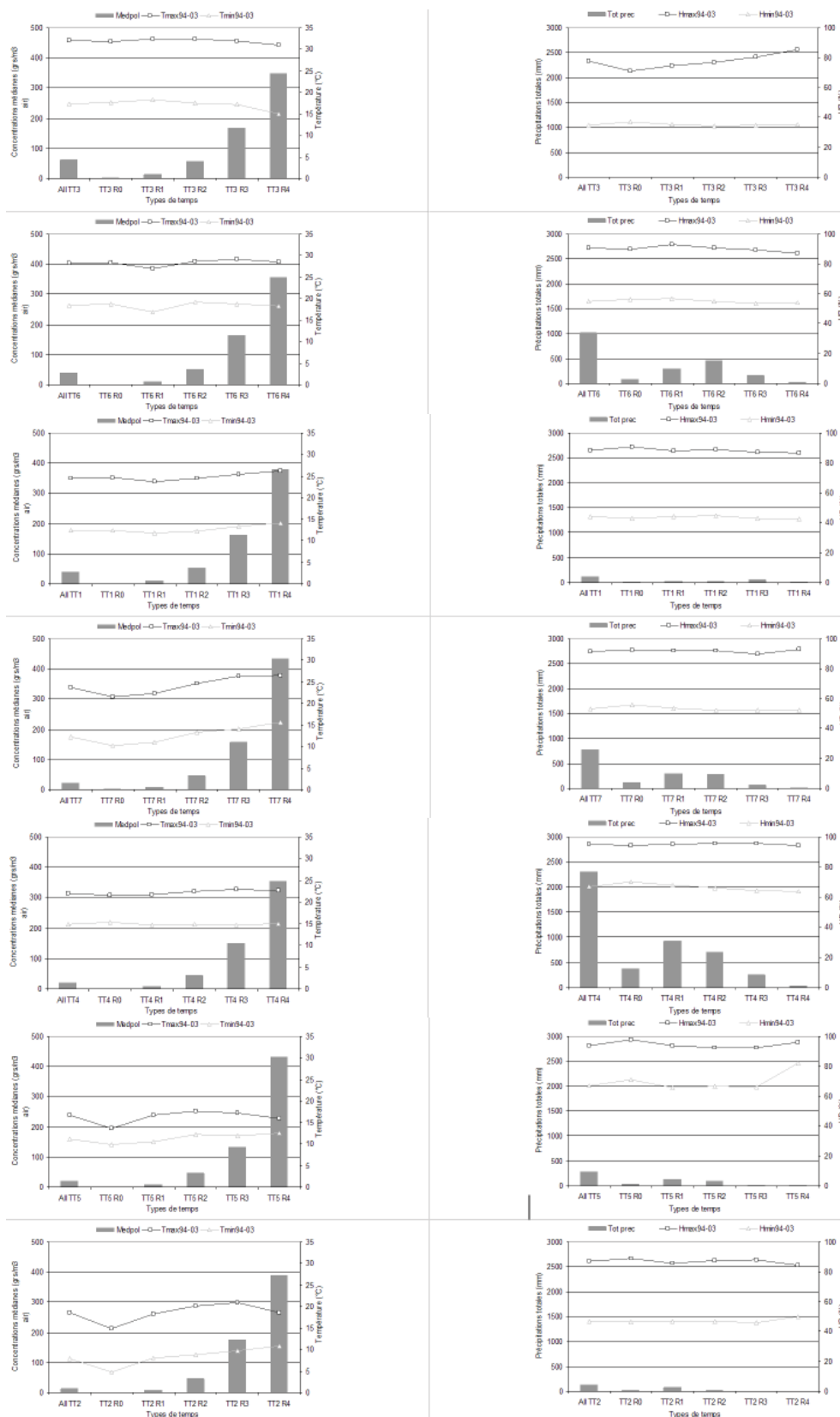


Figure A2.3-2 : Représentation graphique des paramètres météorologiques et polliniques par type de temps selon la classe de risque (concentration pollinique médiane, température moyenne max et min, total de précipitations, humidité relative moyenne max et min)

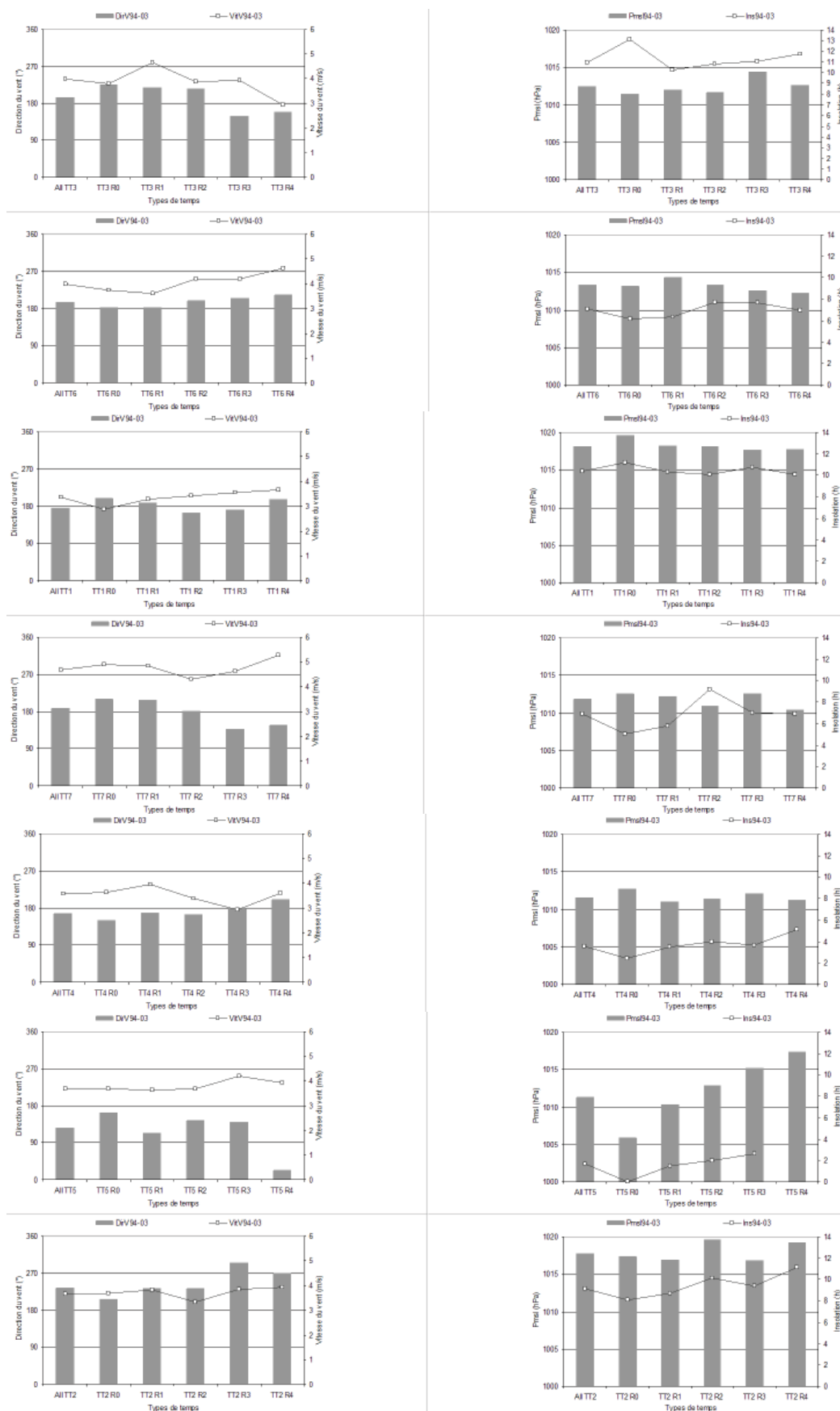


Figure A2.3-3 : Représentation graphique des paramètres météorologiques et polliniques par type de temps selon la classe de risque (Direction et vitesse du vent, pression atmosphérique (Pmsl) et insolation)

## ANNEXE 2.4 : CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES ENTRE 1994 ET 2003 AU CANADA ET DANS LA RÉGION GRANDS LACS / SAINT LAURENT

### A2.4-1 Evolution du temps au Canada entre 1994 et 2003

A compter de 1996, les rapports annuels des conditions météorologiques ayant prévalu au Canada, sont disponibles sur internet et ceci jusqu'à aujourd'hui. Depuis l'année 1997, en plus de ces survols annuels, sont également disponibles des rapports saisonniers. Nous nous attarderons donc exclusivement aux informations concernant les printemps et étés des années étudiées. Les années 1994 et 1995 n'étant pas directement disponibles, nous avons pu extraire quelques informations concernant les températures et précipitations globales du rapport de l'année 1996.

Dans une première approche la Figure A2.4-1 et le Tableau A2.4-1, fournissent quelques indications concernant l'allure des anomalies annuelles et saisonnières de la température nationale de 1948 à 2005 ainsi qu'un classement des 10 années les plus chaudes et des 10 années les plus froides et d'autre part le positionnement des 10 années de notre étude sur une échelle de température allant de l'année la plus chaude à l'année la plus froide de la période 1948-2005.

La Figure A2.4-1a montre une tendance certaine au réchauffement au Canada de 1948 jusqu'à nos jours. Les températures nationales sont toutes au-delà de la normale 1951-1980 à partir de 1991. La ligne en pointillés montre une tendance linéaire au réchauffement de 1.1°C au cours de ces 57 années. La Figure A2.4-1b montre quant à elle que seuls trois printemps (1996, 1997 et 2002) ont connu des températures inférieures à la normale au cours des 10 années d'intérêt. L'année 1998 offre quant à elle le printemps et l'été les plus chauds de l'ensemble des années figurant sur le graphique. 1999 est le second plus chaud printemps de ces 20 années affichées et mise à part l'année 1988, les printemps 2000 et 2001 sont ceux qui suivent. Enfin, la période que nous étudions compte également les plus chauds hivers depuis 1987 à part 1996 et 1997.

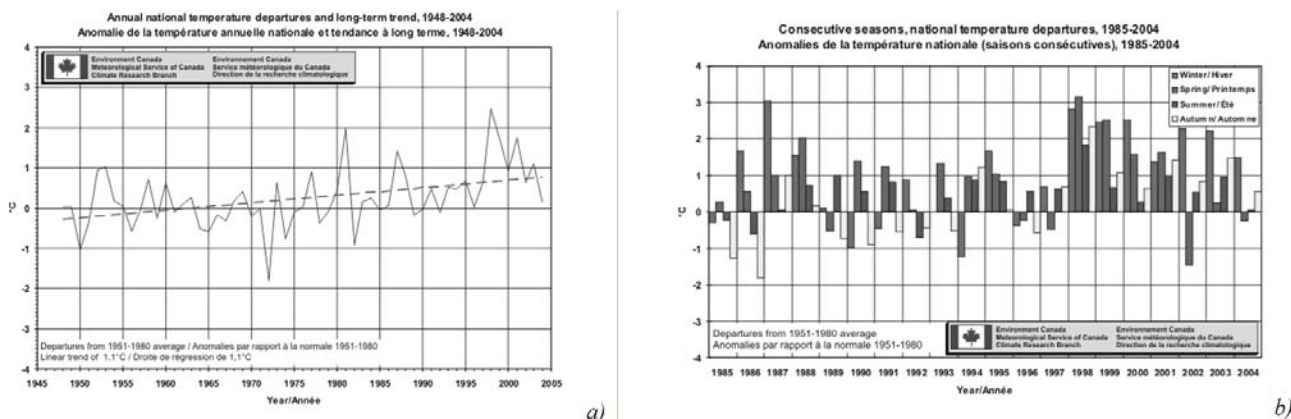


Figure A2.4-1 : Anomalies annuelles (a) et saisonnières (b) de la température nationale au Canada. Source: [http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/annual04/figchart\\_f.html?season=annual&date=2004](http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/annual04/figchart_f.html?season=annual&date=2004)

Ainsi 5 des 10 années qui nous intéressent comptent parmi les 10 plus chaudes de la période 1948-2004 avec dans l'ordre décroissant 1998, 2001, 1999, 2003 et 2000. Aucune en revanche ne comptent parmi les 10 plus froides sur le plan national. L'année 1996 est la plus froide de toutes, classée au 34<sup>ème</sup> rang sur 57 mais 9 années sur 10 sont parmi les 20 plus chaudes de ce demi-siècle (Tableau A2.4-1b).

Concernant les précipitations nationales, les anomalies de la période 1948-2005 sont présentées à la Figure 2.19. A part en 1998 et 2001 qui sont deux années plutôt sèches, les anomalies annuelles sont toutes positives depuis 1994 (Figure 2.19a). Elles le sont particulièrement en 1996 et relativement en 1999. Il est également possible de remarquer selon les saisons une alternance de périodes sèches et d'autres plus humides avec notamment les printemps 1999 et dans une moindre mesure 1996, particulièrement humides et ceux des années 1995, 1998 et 2000 qui avec celui de l'année 1985 sont les plus secs (Figure A2.4-2b). Concernant les étés, 2001, 2003 comptent aussi parmi les 4 seuls étés secs de la période 1985-2005 avec 1992 et 2004.

L'année 1996 est la plus humide de toutes les années de la période 1948-2005 et avec 1999, elles comptent toutes deux parmi les 10 années les plus humides de la période 1948-2005. En ce qui concerne les 8 autres années, elles occupent les 15 à 53<sup>èmes</sup> places (Tableau A2.4-2).

a	Les 10 plus chaudes		Les 10 plus froides		
	Ordre	Année	Anom. °C	Année	Anom. °C
	1	<b>1998</b>	<b>2.5</b>	1972	-1.8
	2	1981	2	1950	-1
	3	<b>2001</b>	<b>1.7</b>	1982	-0.9
	4	<b>1999</b>	<b>1.7</b>	1974	-0.8
	5	1987	1.4	1965	-0.6
	6	<b>2003</b>	<b>1.1</b>	1956	-0.6
	7	1953	1	1964	-0.5
	8	1952	1	1978	-0.4
	9	<b>2000</b>	<b>0.9</b>	1951	-0.4
	10	1977	0.9	1967	-0.3

b	Classement	
	Ordre	Anom. °C
	1	<b>1998</b>
	3	<b>2001</b>
	4	<b>1999</b>
	6	<b>2003</b>
	9	<b>2000</b>
	13	1995
	14	<b>2002</b>
	16	<b>1997</b>
	20	1994
	28	2004
	34	<b>1996</b>

Tableau A2.4-1 : (a) Anomalies de la température annuelle au Canada, les dix années les plus chaudes et les plus froides pour la période 1948 – 2004. (b) Anomalies de la température annuelle au Canada classées de la plus chaude à la plus froide, pour la période 1948 – 2004. Source : <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/annual04>

Les résultats présentés jusqu'ici ne concernent que des valeurs nationales moyennes or, vue l'étendue du pays et la multitude des environnements rencontrés au Canada, on peut parfaitement s'attendre à ce que les conditions climatiques de l'Ouest du pays ne soient pas du tout du même type que celles de l'Est. Nous présentons donc afin de déterminer à quelle région climatique appartient la région de Montréal, une carte du Canada et de ses divisions climatiques à la Figure A2.4-3. L'Est du pays se compose dans le Nord Est du « Canada Atlantique », de la « Forêt Nord-Est » elle-même un peu à l'Ouest de la région de Montréal et de la région Grands Lacs et Saint Laurent à laquelle appartient Montréal. Nous concentrons désormais notre attention sur cette région en particulier.

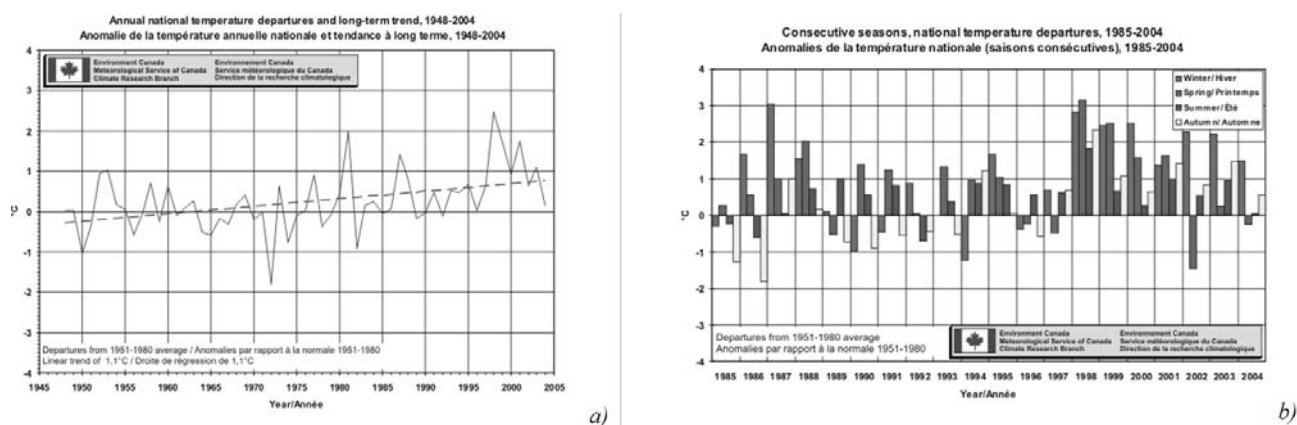


Figure A2.4-2 : Anomalies annuelles (a) et saisonnières (b) des précipitations nationales au Canada. Source: <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/annual04>



a	Les 10 plus fortes		Les 10 plus faibles		
	Ordre	Année	Anom. °C	Année	Anom. °C
	<b>1</b>	<b>1996</b>	<b>9.1</b>	1956	-7.3
	2	1981	8.8	1957	-6.8
	3	1982	7.5	1958	-6
	4	1973	6.8	1948	-4.4
	5	1980	6.6	<b>2001</b>	<b>-4.3</b>
	6	1979	6.5	1961	-4.2
	7	1988	6.3	1967	-4
	<b>8</b>	<b>1999</b>	<b>5.8</b>	1955	-3.4
	9	1991	5.7	1952	-3.4
	10	1984	5.5	1950	-2.4

b	Classement	
	Ordre	Anom. °C
	<b>1</b>	<b>1996</b>
	<b>8</b>	<b>1999</b>
	<b>15</b>	<b>1997</b>
	17	1994
	<b>24</b>	<b>2003</b>
	<b>27</b>	<b>2002</b>
	<b>29</b>	<b>2000</b>
	33	2004
	38	1995
	<b>39</b>	<b>1998</b>
	<b>53</b>	<b>2001</b>

Tableau A2.4-2 : (a) Anomalies des précipitations annuelles au Canada, les dix années avec les précipitations les plus fortes et les plus faibles, pour la période 1948 – 2004. (b) Anomalies des précipitations annuelles au Canada, rangées de la plus forte à la plus faible, pour la période 1948 – 2004. Source: <http://www.mscsmc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/annual04>

## A2.4-2 Evolution du temps dans la région Grands Lacs Saint Laurent

Si sur le plan national 5 des années figuraient parmi les 10 plus chaudes de la période 1948-2005, il n'est plus question ici que de 4 d'entre-elles ; les années 1998, 1999, 2001 et 2002 par ordre décroissant (Tableau A2.4-3). En revanche, aucune des années ne figure toutefois parmi les 10 plus fraîches. Lorsque l'on consulte le Tableau A2.4-3b, on remarque que dans l'ensemble à part en 2002, l'anomalie thermique est inférieure pour une année donnée à ce quelle est à l'échelle nationale. Elle est même inverse et négative en 2003, 1997 et 1994 dans la région étudiée. C'est-à-dire que même si à l'échelle globale ce furent des années relativement plus chaudes que la normale, à l'échelle de la région elles furent plus fraîches que normalement.



Figure A2.4-3 : Les grandes régions climatiques du Canada. Source : <http://www.mscsmc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/annual04>

En ce qui a trait aux précipitations, on peut voir dans le Tableau A2.4-4 que les années 1996 et 1995 furent particulièrement humides à l'échelle de la région alors que celles qui le furent à l'échelle nationale sont 1996 et 1999. À l'échelle du Canada 1996 fut d'ailleurs l'année la plus humide de la période 1948-2004. En revanche l'année 1995 fut plutôt sèche à l'échelle nationale tout comme 1999 qui le fut à celle de la région. Dans le même ordre d'idée l'année 1997 fut plus sèche à la petite échelle qu'elle ne le fut à la plus grande. Remarquons globalement que 5 années Figurent parmi les années humides et 5 parmi les sèches à l'échelle des Grands Lacs et du Saint Laurent contre 7 humides et 3 plus sèches à l'échelle nationale. Parmi ces trois années plus sèches une seule le fut aussi au niveau de la région, à savoir 2001. Notons aussi qu'au niveau national la variabilité est moins grande qu'elle ne l'est au niveau régional. Enregistrons finalement que 1996 fut l'année la plus humide sur le plan régional suivie de 1995, 2003 et 2000 et que 1998, 2002, 2001 et 1999 furent les plus sèches de la période. Le Tableau A2.4-5 synthétise l'ensemble de ces informations.

a Les 10 années les plus chaudes					a Les 10 années les plus froides						
		Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada				Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada	
Ordre	Année	Anom.°C	Année	Anom.°C	Ordre	Année	Anom.°C	Année	Anom.°C	Ordre	Anom.°C
1	<b>1998</b>	<b>2.3</b>	<b>1998</b>	<b>2.5</b>	1	1978	-1	1972	-1.8		
2	<b>1999</b>	<b>1.6</b>	1981	2	2	1972	-0.9	1950	-1		
3	1953	1.5	<b>2001</b>	<b>1.7</b>	3	1976	-0.7	1982	-0.9		
4	<b>2001</b>	<b>1.5</b>	<b>1999</b>	<b>1.7</b>	4	1980	-0.7	1974	-0.8		
5	1987	1.2	1987	1.4	5	1963	-0.6	1965	-0.6		
6	1991	1.2	<b>2003</b>	<b>1.1</b>	6	1992	-0.6	1956	-0.6		
7	1990	1.1	1953	1	7	1989	-0.6	1964	-0.5		
8	<b>2002</b>	<b>1.1</b>	1952	1	8	1950	-0.4	1978	-0.4		
9	1973	1.1	<b>2000</b>	<b>0.9</b>	9	1958	-0.4	1951	-0.4		
10	1949	1.1	1977	0.9	10	1956	-0.4	1967	-0.3		

b Gr. Lacs/ St-Laur.		
Ordre	Année	Anom.°C
1	1998	2.3
2	1999	1.6
4	2001	1.5
8	<b>2002</b>	<b>1.1</b>
16	2000	0.4
22	1995	0.2
29	2004	0.1
34	1996	0
36	<b>2003</b>	<b>-0.1</b>
41	<b>1997</b>	<b>-0.3</b>
43	<b>1994</b>	<b>-0.3</b>

b Canada		
Ordre	Année	Anom.°C
1	1998	2.5
3	2001	1.7
4	1999	1.7
6	<b>2003</b>	<b>1.1</b>
9	2000	0.9
13	1995	0.7
14	<b>2002</b>	<b>0.6</b>
16	<b>1997</b>	<b>0.6</b>
20	<b>1994</b>	<b>0.5</b>
28	2004	0.1
34	1996	0

Tableau A2.4-3 : (a) Anomalies régionales de la température annuelle dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, les dix années les plus chaudes et les dix années les plus froides de la période 1948 – 2004. et (b) Anomalies de la température annuelle dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent classées de la plus chaude à la plus froide, pour la période 1948 – 2004. Source : <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/annual04>

Du Tableau A2.4-5, trois groupes d'années ressortent qui sont :

- ✓ les années chaudes et sèches : 1998, 1999, 2001 et 2002
- ✓ les années humides et fraîches : 1994, 1996, et 2003
- ✓ les années intermédiaires : 1995, 1997 et 2000.

L'année la plus extrême de toutes est sans nul doute 1998 toutes saisons confondues.

a	Les 10 années les plus sèches			
	Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada	
Ordre	Année	Anom. °C	Année	Anom. °C
1	1990	19.1	1996	9.1
2	1972	16.9	1981	8.8
3	1983	15.8	1982	7.5
4	1954	12.9	1973	6.8
5	1973	12.9	1980	6.6
6	1996	12.2	1979	6.5
7	1986	12.1	1988	6.3
8	1977	10.6	1999	5.8
9	1995	10.2	1991	5.7
10	1979	9.6	1984	5.5

a	Les 10 années les plus humides			
	Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada	
Ordre	Année	Anom. °C	Année	Anom. °C
1	1963	-16	1956	-7.3
2	1953	-15.6	1957	-6.8
3	1958	-13.5	1958	-6
4	1964	-12.9	1948	-4.4
5	1955	-10.4	<b>2001</b>	<b>-4.3</b>
6	<b>1998</b>	<b>-8.9</b>	1961	-4.2
7	1952	-8.3	1967	-4
8	1948	-8	1955	-3.4
9	1956	-7.9	1952	-3.4
10	<b>2002</b>	<b>-7.7</b>	1950	-2.4

b	Gr. Lacs/ St-Laur.	
	Ordre	Anom. °C
6	1996	12.2
9	1995	10.2
12	2003	8.3
16	2000	7.1
26	1994	3.2
33	1997	-0.7
38	1999	-2.8
43	2001	-6.1
48	2002	-7.7
52	1998	-8.9

b	Canada	
	Ordre	Anom. °C
1	1996	9.1
8	1999	5.8
15	1997	3
17	1994	2.3
24	2003	1.8
27	2002	1.4
29	2000	0.8
38	1995	-0.3
39	1998	-0.9
53	2001	-4.3

Tableau A2.4-4 : (a) Anomalies des précipitations annuelles dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, les dix années avec les précipitations les plus fortes et les plus faibles, pour la période 1948 – 2004. et (b) Anomalies des précipitations annuelles dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, rangées de la plus forte à la plus faible, pour la période 1948 – 2004. Source : <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/annual03>

ANOMALIES	TEMPÉRATURES ANNUELLES									
	Plus chaud ↔ Plus frais									
Précipitations annuelles	1998	1999	2001	2002	2000	1995	1996	2003	1997	1994
Plus humide							x			
					x			x		
										x
									x	
		x								
			x							
				x						
Plus sec	x									

Tableau A2.4-5 : Synthèse des anomalies de température et de précipitations annuelles pour la région Grands Lacs / Saint Laurent entre 1994 et 2003

### A2.4-2.1 Analyse des conditions de printemps

Parmi les 10 plus chauds printemps du dernier demi siècle figurent les années 1998, 2000 et 1999 avec dans tous les cas plus de 1.8°C de moyenne supérieure à la normale 1951-1980 (Tableau A2.4-6). A l'échelle du Canada s'ajoute l'année 2001. En revanche, les printemps 1997, 1996 et 2003 comptent parmi les 10 plus froids auxquels on peut aussi adjoindre 2002 et 1994 parmi les plus frais. Par ailleurs l'année 2000 est la seule année pendant laquelle l'anomalie positive est

supérieure à Montréal par rapport à l'échelle nationale. En revanche les anomalies régionales négatives des années plus fraîches sont toutes inférieures à celles obtenues pour les mêmes années sur le plan national. Les années 1994 et 2002 présentent même des signes inverses aux deux échelles.

a	Les 10 années les plus chaudes				a	Les 10 années les plus froides			
	Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada			Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada	
	Ordre	Année	Anom.°C	Année		Anom.°C	Ordre	Année	Anom.°C
1	<b>1998</b>	<b>2.8</b>	<b>1998</b>	<b>3.2</b>	1	1956	-2.2	1974	-1.8
2	1987	2.5	<b>1999</b>	<b>2.5</b>	2	1950	-2	1964	-1.8
3	1991	2.5	2005	2.1	3	1967	-1.7	1967	-1.6
4	1977	2.3	1988	2	4	<b>1997</b>	<b>-1.6</b>	1948	-1.5
5	<b>2000</b>	<b>2</b>	1977	1.9	5	1972	-1.5	<b>2002</b>	<b>-1.5</b>
6	1986	1.8	1952	1.8	6	1984	-1.3	1972	-1.2
7	<b>1999</b>	<b>1.8</b>	1981	1.7	7	<b>1996</b>	<b>-1.1</b>	1956	-1.2
8	1973	1.6	<b>2001</b>	<b>1.6</b>	8	1971	-1.1	1954	-1.1
9	1955	1.2	1953	1.6	9	1978	-1.1	1982	-1
10	1962	1	<b>2000</b>	<b>1.6</b>	10	<b>2003</b>	<b>-0.8</b>	1961	-0.7

b	Gr. Lacs/ St-Laur.	
Ordre	Année	Anom.°C
1	1998	2.8
5	<b>2000</b>	<b>2</b>
7	1999	1.8
13	2001	0.9
26	1995	0.3
35	1994	-0.2
36	2002	-0.3
49	2003	-0.8
52	1996	-1.1
55	1997	-1.6

b	Canada	
Ordre	Année	Anom.°C
1	1998	3.2
2	1999	2.5
8	2001	1.6
10	<b>2000</b>	<b>1.6</b>
16	1995	1
19	1994	1
29	2003	0.3
37	1996	-0.2
44	1997	-0.5
54	2002	-1.5

Tableau A2.4-6 : (a) Anomalies des températures printanières dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, les dix années avec les températures les plus chaudes et les plus fraîches, pour la période 1948 – 2004. et (b) Anomalies des températures printanières dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, rangées de la plus chaude à la plus fraîche, pour la période 1948 – 2004. Source : <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/spring03>

Le Tableau A2.4-7 présente les anomalies de précipitations. Au niveau régional les années 2002 et 2000 sont respectivement au 5 et 10<sup>èmes</sup> rangs des années ayant connu les printemps les plus humides. Parmi les dix printemps les plus secs, on trouve 1999 au 3<sup>ième</sup> rang de même que 2001 au 9<sup>ième</sup>. Au sein des 10 années à l'étude nous côtoyons autant les années les plus sèches du demi siècle 1948-2004 avec 1999 et 2001 que les plus humides avec notamment 2002. Ces années extrêmes sont beaucoup plus extrêmes dans la région à l'étude qu'à l'échelle du pays et ceci autant dans un sens que dans l'autre. Le printemps 1999 vraiment excessivement sec dans la région Grands Lacs / Saint Laurent est en revanche la troisième année plus humide au Canada et inversement le printemps 2000 qui se positionne en 46<sup>ième</sup> position comme étant une saison plutôt sèche au Canada est en réalité la 10<sup>ième</sup> année plus humide dans la région d'intérêt.

Le Tableau A2.4-8 fait la synthèse de toutes ces informations. Il ressort ainsi des printemps chauds voire très chauds mais plutôt humides. Il s'agit du cas des saisons 1995, 1998 et 2000 avec le fait que 1998 est excessivement chaud et à la limite supérieure du déficit hydrique. Il existe ensuite des printemps chauds et secs que sont ceux de 1999 et 2001. Il y a aussi des printemps plus frais et humides. Nous pouvons grouper ici 1994, 1996, 2002 et 2003 avec la saison 2002 qui est notamment la plus extrême du point de vue des précipitations. Pour finir, le printemps 1997 se caractérise par des conditions beaucoup plus fraîches que la normale et relativement sèches.

a	Les 10 années les plus sèches			
	Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada	
	Ordre	Année	Anom.°C	Année
1	1983	54.3	1979	28.8
2	1973	34.7	1977	26
3	1991	34.3	1999	16.5
4	1976	34.1	1976	12.6
5	<b>2002</b>	<b>33.6</b>	2005	12.3
6	1974	32.7	1986	11.6
7	1979	24.8	1983	10.6
8	1948	24.4	<b>1996</b>	<b>9.5</b>
9	2004	21.2	1993	8.8
10	<b>2000</b>	<b>21.1</b>	1990	8.7

a	Les 10 années les plus humides			
	Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada	
	Ordre	Année	Anom.°C	Année
1	1958	-44.3	1956	-21.3
2	1965	-32	1957	-15.9
3	<b>1999</b>	<b>-26.8</b>	1950	-15.1
4	1962	-24.7	1958	-11.1
5	1957	-22.6	1949	-9
6	1971	-21	1963	-7.9
7	1988	-20	1969	-7.1
8	2005	-18.9	1967	-7
9	<b>2001</b>	<b>-18.4</b>	1965	-6.8
10	1966	-18	1954	-6.6

b	Gr. Lacs/ St-Laur.	
	Ordre	Anom.°C
5	2002	33.6
10	2000	21.1
11	1994	21
18	2003	12.2
24	1995	6.8
25	1996	6.3
31	1998	0.4
34	1997	-0.4
50	2001	-18.4
56	1999	-26.8

b	Canada	
	Ordre	Anom.°C
3	1999	16.5
8	1996	9.5
11	1994	8.6
19	2002	5.6
22	2001	4.3
23	2003	4.2
33	1997	1
40	1995	-3.5
41	1998	-3.5
46	2000	-4.7

Tableau A2.4-7 : (a) Anomalies des précipitations printanières dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, les dix années avec les précipitations les plus fortes et les plus faibles, pour la période 1948 – 2004. et (b) Anomalies des précipitations printanières dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, rangées de la plus forte à la plus faible, pour la période 1948 – 2004. Source : <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/spring03>

ANOMALIES	TEMPERATURES PRINTEMPS									
	Plus chaud ↔ Plus frais									
Précipitations printemps	1998	2000	1999	2001	1995	1994	2002	2003	1996	1997
Plus humide							x			
↑		x								
						x				
					x					
								x		
	x									
										x
				x						
Plus sec			x							

Tableau A2.4-8 : Synthèse des anomalies de température et de précipitations printanières pour la région Grands Lacs / Saint Laurent entre 1994 et 2003



## A2.4-2.2 Analyse des conditions estivales

Une fois les printemps caractérisés, il ne reste plus qu'à faire la même chose avec les étés. Le Tableau A2.4-9 présente les informations concernant les températures estivales, le Tableau A2.4-10 les précipitations et le Tableau A2.4-11 fait office de synthèse. Remarquons que seuls deux des étés étudiés se situent dans les 10 plus chauds du dernier siècle. Il s'agit des étés 1995 et 1999. En revanche, 5 d'entre eux Figurent parmi les 10 plus chauds sur le plan national. Dans tous les cas de Figure en revanche, aucun ne Figure parmi les plus frais. De façon plus globale, la plupart des étés étudiés sont plus chauds ou proches de la normale de saison. Seule l'année 2000, présente des valeurs négatives. Outre 1995 et 1999 qui sont les plus chauds, l'été 2002 est deux fois plus chaud que la normale dans la région Grands lacs/ Saint Laurent qu'à l'échelle du pays. Les étés 2001 et 1998 sont très proches également de 2002.

a	Les 10 années les plus chaudes			
	Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada	
Ordre	Année	Anom. °C	Année	Anom. °C
1	1955	2.1	1998	1.8
2	1949	1.7	1989	1
3	1973	1.5	2001	1
4	1959	1.4	2003	1
5	<b>1995</b>	<b>1.4</b>	1994	0.9
6	<b>1999</b>	<b>1.3</b>	1955	0.8
7	1991	1.2	1995	0.8
8	1983	1.1	1991	0.8
9	1952	1.1	1973	0.8
10	1988	1	1975	0.8

a	Les 10 années les plus froides			
	Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada	
Ordre	Année	Anom. °C	Année	Anom. °C
1	2005	0	2005	0
2	1992	-1.8	1968	-0.8
3	1982	-1.3	1978	-0.8
4	1965	-1.3	1965	-0.7
5	1958	-1.1	1992	-0.7
6	1985	-0.9	1950	-0.7
7	1986	-0.8	1972	-0.7
8	1972	-0.8	1986	-0.6
9	1956	-0.7	1964	-0.5
10	1977	-0.7	1982	-0.4

b	Gr. Lacs/ St-Laur.	
	Ordre	Anom. °C
5	1995	1.4
6	1999	1.3
12	2002	1
13	2001	0.9
14	1998	0.9
19	2003	0.5
25	1996	0.3
27	1994	0.1
31	1997	0
42	2000	-0.4

b	Canada	
	Ordre	Anom. °C
1	1998	1.8
3	2001	1
4	2003	1
5	1994	0.9
7	1995	0.8
12	1999	0.7
17	1997	0.6
19	1996	0.6
20	2002	0.5
26	2000	0.3

Tableau A2.4-9 : (a) Anomalies des températures estivales dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, les dix années avec les températures les plus chaudes et les plus fraîches, pour la période 1948 – 2004 et (b) Anomalies des températures estivales dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, rangées de la plus chaude à la plus fraîche, pour la période 1948 – 2004. Source : <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/summer04>

Concernant les précipitations (Tableau A2.4-10), deux étés se classent parmi les 10 étés les plus humides 1994 et 2000 et deux années sont particulièrement sèches, à savoir 2001 et 2002. Notons aussi qu'à part 2000, de 1997 à 2003, tous les étés sont en déficit hydrique. Il est possible qu'une année fortement humide à l'échelle régionale ne le soit pas du tout ou tout au moins beaucoup moins à l'échelle nationale comme c'est le cas de l'été 2001 à Montréal par exemple qui est l'été le plus sec des dernières 50 années.

Le Tableau A2.4-11 permet de faire la synthèse de ces résultats estivaux. Cette fois-ci, seule l'année 2000 présente les caractéristiques d'un été plus frais et plus humide que la normale et 1994, bien que légèrement plus chaude que la normale de saison est encore plus humide. Il s'agit du 3<sup>ème</sup> été le plus humide du dernier demi siècle. Différentes catégories sont identifiables, avec des étés chauds et secs que sont 1998, 1999, 2001, 2002 et 2003, un été plus frais et humide en

2000, trois autres chauds mais humides en 1994, 1995 et 1996 et enfin 1997 caractérisé par un été dans la normale des températures mais sec.

La Figure A2.4-12 permet de visualiser graphiquement la distribution des années selon les facteurs température et précipitations dans la région Grands Lacs / Saint Laurent. La tendance à avoir des années plutôt chaudes est marquée. En revanche, question précipitations, le partage est plus équitable.

a Les 10 années les plus sèches					a Les 10 années les plus humides						
		Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada				Gr. Lacs/ St-Laurent		Canada	
Ordre	Année	Anom.°C	Année	Anom.°C	Ordre	Année	Anom.°C	Année	Anom.°C	Année	Anom.°C
1	Données manquantes				1	1972	31.4	1984	14.6		
2	<b>2001</b>	<b>-26.8</b>	1958	-14.3	2	1992	30.3	1988	13.1		
3	1955	-25.3	1961	-10	3	<b>1994</b>	<b>27</b>	1993	12.3		
4	1991	-23.7	1955	-9.6	4	1980	23	2000	10.7		
5	1953	-23.5	1967	-7.2	5	1981	21	1973	10.6		
6	1948	-23.1	1950	-5.9	6	1986	19.9	1981	9.1		
7	1983	-17.5	1951	-5.1	7	2004	18.1	1980	9		
8	1978	-15.6	1972	-4.3	8	1967	16.7	1987	8.6		
9	<b>2002</b>	<b>-15.4</b>	1957	-4.1	9	<b>2000</b>	<b>16.4</b>	1997	8		
10	1949	-14.6	1992	-3.7	10	1961	15.7	1999	7.4		

b Gr. Lacs/ St-Laur.			b Canada		
Ordre	Année	Anom.°C	Ordre	Année	Anom.°C
3	1994	27	4	2000	10.7
9	2000	16.4	9	1997	8
14	1996	10.8	10	1999	7.4
17	1995	9.7	13	2002	7.3
28	2003	-0.7	17	1996	5.2
32	1999	-2	26	1994	3
34	1997	-2.3	34	1998	0.1
40	1998	-4.3	36	1995	-0.1
50	2002	-15.4	38	2003	-1
57	2001	-26.8	39	2001	-1.3

Tableau A2.4-10 : (a) Anomalies des précipitations estivales dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, les dix années avec les précipitations les plus fortes et les plus faibles, pour la période 1948 – 2004 et (b) Anomalies des précipitations estivales dans la région des Grands Lacs/Saint Laurent, rangées de la plus forte à la plus faible, pour la période 1948 – 2004. Source : <http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/summer04>

ANOMALIES	TEMPERATURES ETE									
	Précipitations estivales									
	Plus chaud ↔ Plus frais									
Plus humide	1994	1999	2002	2001	1998	2003	1996	1994	1997	2000
								x		x
							x			
	x									
					x					
		x							x	
					x					
			x							
Plus sec				x						

Tableau A2.4-11 : Synthèse des anomalies de température et de précipitations estivales pour la région Grands Lacs / Saint Laurent entre 1994 et 2003

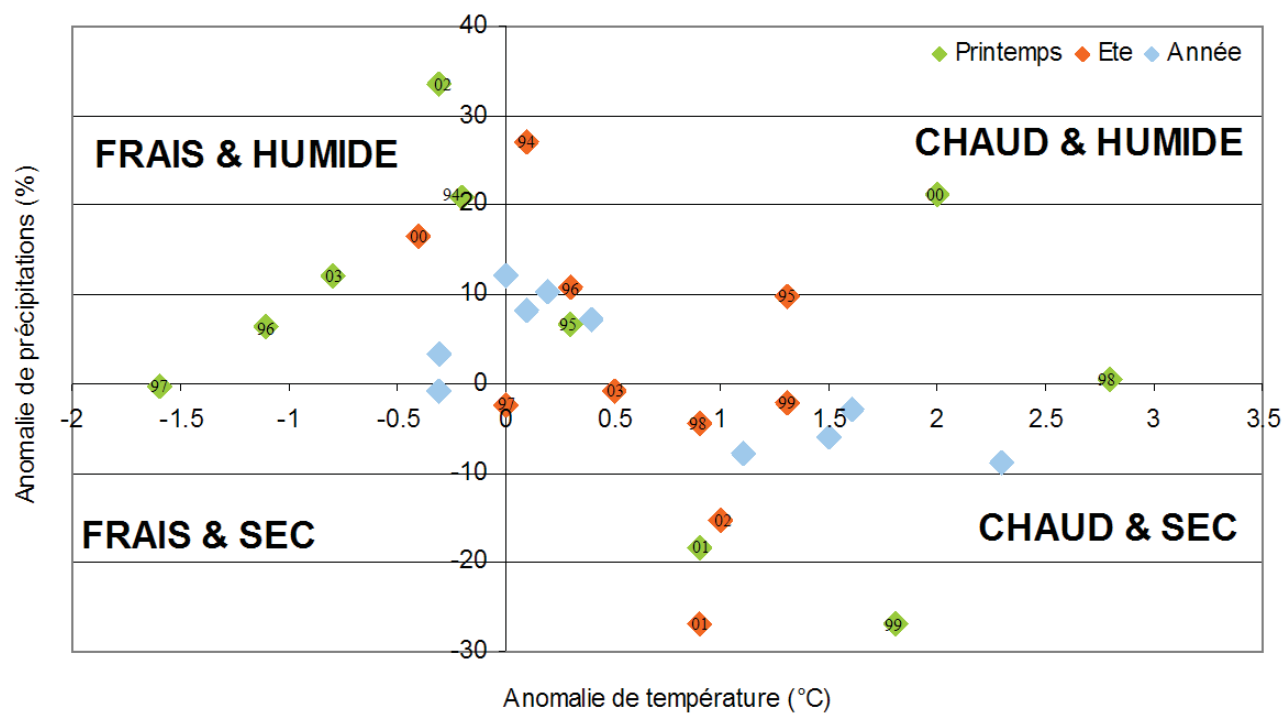


Figure A2.4-12 : Synthèse graphique des anomalies de température et précipitations dans la région Grands lacs / Saint Laurent pour les années, printemps et été 1994-2003 para rapport à la normale 1951-1980. D'après données d'Environnement Canada.

## ANNEXE 2.5 : DESCRIPTION DES TYPES DE TEMPS

D'après Sheridan (2002). Adapté du site : <http://sheridan.geog.kent.edu/ssc.html>

TT1- DM Tempéré sec	"air is mild and dry. It is typically found in the eastern and central U.S. associated with zonal flow aloft, when adiabatically-warmed and dried air moves eastward after crossing the Rocky Mountains. It may also be found in the southeastern U.S. when polar air is advected around a Air doux et sec. Typique du centre et de l'Est des Etats Unis, associé à un flux d'air zonal réchauffé et asséché adiabatiquement lorsque qu'il se déplace d'Ouest en Est traversant les Montagnes Rocheuses. On peut également le trouver dans le Sud Est américain lorsque de l'air polaire est advecté en surface par le biais d'un anticyclone avec une longue trajectoire au-dessus de l'océan atlantique.
TT2- DP Polaire sec	"synonymous with the traditional cP air mass classification. This air mass is generally advected from Canada through circulation around a cold-core anticyclone, and is usually associated with the lowest temperatures observed in a region for a particular time of year, as well as clear, dry Masse d'air généralement advectée depuis le Canada dans une circulation anticyclonique au cœur froid et est normalement associé aux plus froides températures observées dans une région pendant une période particulière de l'année, lorsque le ciel est clair et les conditions sèches.
TT3- DT Tropical sec	"The air mass is generally the same as the cT air mass; it represents the hottest and driest conditions found at any location. There are two modes of development for this air mass: either it is advected from the southwestern U.S. or Sonoran Desert of Mexico, or it is produced by rapidly Masse d'air qui représente les conditions les plus chaudes et les plus sèches que l'on puisse trouver en n'importe quel point. Il existe deux modes de développement de ce type de masse d'air : soit elle est advectée du Sud Ouest des Etats-Unis ou du désert de Sonoran au Mexique, ou elle
TT4- MM Tempéré humide	"air is considerably warmer and more humid than MP. The MM air mass typically appears in a zone south of MP air, still in an area of overrunning but with the responsible front much nearer. This air mass may persist for many days if frontal movement is particularly lethargic." Air beaucoup plus chaud et humide que le type de temps MP (5). On trouve généralement ce type de temps en bordure sud du type de temps MP, dans une région encore sous l'effet de la circulation mais beaucoup plus proche du front. Cette masse d'air peut être persistante durant plusieurs
TT5- MP Polaire humide	"air is a large subset of the mP air mass; weather conditions are typically cloudy, humid, and cool. MP air appears either by inland transport from a cool ocean, or as a result of frontal overrunning well to the south of the region." Les conditions atmosphériques associées à ce type de temps sont particulièrement nuageuses, humides et froides. Soit ce type de masse d'air résulte du transport vers le continent d'une masse d'air océanique froide, ou bien résulte d'une circulation frontale en mouvement vers le Sud de
TT6- MT Tropical humide	"analogous to mT, is warm and very humid. It is typically found in warm sectors of frontal cyclones or in a gulf return flow on the western side of Masse d'air chaude et très humide. On la trouve typiquement dans le secteur chaud des circulations cycloniques ou dans le flux de retour sur la face occidentale d'un anticyclone situé dans l'Est ou le centre des Etats-Unis.
TT66 - MT+ Tropical humide+	"is a subset of MT often used in our heat research. It is defined as an MT day where both morning and afternoon temperatures are above seed Masse d'air définie comme le type de temps MT (6) mais dans laquelle la température du matin et de l'après midi sont supérieures aux valeurs moyennes de la masse d'air et caractérise la part la plus oppressive de ce type de temps.
TT7- T Transition	"situation is also identified on days when one air mass gives way to another". Cette situation se produit lorsqu'une masse d'air cède sa place à une autre.

## ANNEXE 3.1 : PARAMÈTRES D'INTÉGRATION UTILISÉS POUR LES SIMULATIONS

Années	Paramètres d'intégration	Simulation 1	Simulation 2	Simulation 3
	Longueur du pas de temps	900s = 15 min	180s = 3 min	30s
	Intervalle d'archivage en pdt	12 pdt = 3 h	20 pdt = 1 h	30 pdt = 15 min
toutes	Surface considérée (km <sup>2</sup> )	3000	420	60
	Résolution (km)	49	7	1
	Pilotage	NCEP/NCAR	simulation 1	simulation 2
	Date de début de la simulation	15/07/94 00:00Z	03/08/94 00 :00 Z	10/08/94 00 :00 Z
	Date de fin de la simulation	16/09/94 21:00Z		15/09/94 23 :00 Z
	Nombre de pas de temps total	6144	22080	48960/106560
1994	Toit rigide MRCC (m)	29042.2	29042.2	34120
	Niveaux thermo	29	29	30
	Niveaux diagnostics	25	25	25
	Topo			Haute résolution GCMii
	Date de début de la simulation	15/07/95 00:00Z	26/07/95 00 :00 Z	10/08/95 00 :00 Z
	Date de fin de la simulation	17/09/95 21:00Z		15/09/95 23 :00 Z
	Nombre de pas de temps total	6240	26400	48960/106560
1995	Toit rigide MRCC (m)	29042.2	29042.2	34120
	Niveaux thermo	29	29	30
	Niveaux diagnostics	25	25	25
	Topo			Haute résolution GCMii
	Date de début de la simulation	15/07/96 00:00Z	25/07/96 00 :00 Z	10/08/96 00 :00 Z
	Date de fin de la simulation	17/09/96 21:00Z		15/09/96 23 :00 Z
	Nombre de pas de temps total	6240	26400	48960/106560
1996	Toit rigide MRCC (m)	29042.2	29042.2	34120
	Niveaux thermo	29	29	30
	Niveaux diagnostics	25	25	25
	Topo			Haute résolution GCMii
	Date de début de la simulation	15/07/97 00:00Z	03/08/97 00 :00 Z	10/08/97 00 :00 Z
	Date de fin de la simulation	16/09/97 21:00Z		15/09/97 23 :00 Z
	Nombre de pas de temps total	6144	24000	48960/106560
1997	Toit rigide MRCC (m)	29042.2	29042.2	34120
	Niveaux thermo	29	29	30
	Niveaux diagnostics	25	25	25
	Topo			Haute résolution GCMii
	Date de début de la simulation	15/07/98 00:00Z	25/07/98 00 :00 Z	10/08/98 00 :00 Z
	Date de fin de la simulation	16/09/98 21:00Z		15/09/98 23 :00 Z
	Nombre de pas de temps total	6144	26400	48960/106560
1998	Toit rigide MRCC (m)	29042.2	29042.2	34120
	Niveaux thermo	29	29	30
	Niveaux diagnostics	25	25	25
	Topo			Haute résolution GCMii
	Date de début de la simulation	15/07/99 00:00Z	25/07/99 00 :00 Z	10/08/99 00 :00 Z
	Date de fin de la simulation	17/09/99 21:00Z		15/09/99 23 :00 Z
	Nombre de pas de temps total	6240	26400	48960/106560



1999	Toit rigide MRCC (m)	29042.2	29042.2	34120
	Niveaux thermo	29	29	30
	Niveaux diagnostics	25	25	25
	Topo			Haute résolution GCMii
	Date de début de la simulation	15/07/00 00:00Z	25/07/00 00 :00 Z	10/08/00 00 :00 Z
	Date de fin de la simulation	16/09/00 21:00Z		15/09/00 23 :00 Z
	Nombre de pas de temps total	6144	26400	48960/106560
2000	Toit rigide MRCC (m)	29042.2	29042.2	34120
	Niveaux thermo	29	29	30
	Niveaux diagnostics	25	25	25
	Topo			Haute résolution GCMii
	Date de début de la simulation	10/07/01 00:00Z	20/07/01 00 :00 Z	10/08/01 00 :00 Z
	Date de fin de la simulation	18/09/01 21:00Z		15/09/01 23 :00 Z
	Nombre de pas de temps total	6816	28800	48960/106560
2001	Toit rigide MRCC (m)	29042.2	29042.2	34120
	Niveaux thermo	29	29	30
	Niveaux diagnostics	25	25	25
	Topo			Haute résolution GCMii
	Date de début de la simulation	10/07/02 00:00Z	20/07/02 00 :00 Z	10/08/02 00 :00 Z
	Date de fin de la simulation	18/09/02 21:00Z		15/09/02 23 :00 Z
	Nombre de pas de temps total	6816	28800	48960/106560
2002	Toit rigide MRCC (m)	29042.2	29042.2	34120
	Niveaux thermo	29	29	30
	Niveaux diagnostics	25	25	25
	Topo			Haute résolution GCMii
	Date de début de la simulation	10/07/02 00:00Z	25/07/03 00 :00 Z	10/08/03 00 :00 Z
	Date de fin de la simulation	18/09/02 21:00Z		15/09/03 23 :00 Z
	Nombre de pas de temps total	6816	26400	48960/106560
2003	Toit rigide MRCC (m)	29042.2	29042.2	34120
	Niveaux thermo	29	29	30
	Niveaux diagnostics	25	25	25
	Topo			Haute résolution GCMii

## ANNEXE 3.2 : PARAMÉTRAGE DU MRCC-POLLEN ET DÉMARCHE

L'exécution du MRCC-Pollen doit suivre 5 étapes. Dans un premier temps, il est nécessaire de définir les termes de l'expérience à mener, dans un fichier appelé `PARAMETRES` en l'éditant. C'est dans ce fichier que l'on désigne la résolution du modèle, la durée de l'intégration, le pas de temps de sauvegarde, la fréquence d'archivage, les champs géophysiques, la fréquence du calcul de la radiation, le chemin absolu des répertoires d'archive ....

### A3.2-1 Compilation du modèle

La compilation du modèle doit être faite autant de fois que l'on apporte au fichier `PARAMETRES` des modifications de certains éléments structurels tels notamment les paramètres de la grille (nombre de niveaux dans la verticale, déplacement du centre de la grille ou encore résolution horizontale). La compilation est une étape décisive qui permet de créer les répertoires et fichiers nécessaires à la lecture et à l'archivage des données du modèle ainsi que d'indiquer au modèle où se trouvent les bibliothèques qui renferment les programmes nécessaires à son fonctionnement. Les différentes versions des bibliothèques de fichiers sources FORTRAN sont gérées à l'aide de l'utilitaire UNIX RCS (Revision Control System). La Division de Recherche en Prévision Numérique (RPN) à Dorval a créé un utilitaire facilitant l'utilisation de RCS. Il s'agit d'`étager` (environnement de travail automatisé de gestion d'expériences avec RCS). Cette commande permet entre autre de faire la liste des bibliothèques, de faire la recherche d'une chaîne de caractères dans l'ensemble des fichiers et d'extraire un fichier. Elle permet ainsi de localiser les répertoires RCS de MC2 pour ce qui concerne les termes de la dynamique et du COUPLEUR-II pour ce qui est de la physique du modèle, extraite de GCMii. On crée ainsi le `Makefile` qui est la bibliothèque d'objets et l'absolu du modèle, une sorte de livre de recettes qui fait appeler au contenu des répertoires maîtres RCS. En plus de ce fichier, deux autres fichiers sont également créés au cours de cette procédure qui sont `arbre_de_dependance` qui présente la liste des « common deck » contenus dans chaque sous programme ainsi que `make_cdk` qui lui, présente la liste des sous programmes qui utilisent chaque « common deck ». Enfin, pour clore cette étape, il faut créer une bibliothèque d'objets ce qui signifie une version compilée de tous les fichiers requis, pour la plupart en FORTRAN. Cette étape génère en bout de course un fichier qui contient toutes les bibliothèques du modèle et crée l'exécutable, à savoir le MRC lui même.

### A3.2-2 Préparation des données de pilotage

La compilation achevée, il s'agit de préparer les données qui vont piloter l'expérience. En effet le modèle a besoin de trois fichiers pour cela. Le premier, `AN`, contient l'information initiale relevant de la physique c'est-à-dire les champs géophysiques aux frontières au sol du GCMii, le second, `INMRC`, renferme les données de pilotage de la dynamique aux frontières latérales et au sommet et enfin `mrc_settings` qui contient la liste des paramètres de contrôle dont les valeurs proviennent du fichier `PARAMETRES`. Ces trois fichiers sont créés par le script `lance_pilomrc` qui prend les archives GCM du CCCma pour ce qui est des champs atmosphériques (`$$$FILE`) en coordonnées  $\zeta$  ou  $\epsilon$  de même que les champs de surface (`$$$FILE`) sur une grille gaussienne ainsi qu'un fichier de référence du CCCma contenant les champs géophysiques (`$$$LLPHYS`) exprimés en latitude/longitude. Le fichier `PARAMETRES` doit contenir le bon chemin absolu pour ces fichiers, de même que le pas de temps correspondant à la simulation de pilotage. Ainsi, au même titre que figure dans le fichier `PARAMETRES` le chemin vers les champs géophysiques de surface noté `LLPHYS=/home/climato/climato/IPH/iph051p`, le chemin existe aussi vers les paramètres polliniques à savoir la cartographie des sources de pollen pour la région à l'étude dans le contexte des simulations à la plus fine échelle, noté `EMIS=/home/goyettej/bin/POLLEN`. La décomposition du script `lance_pilomrc1` laisse apparaître plusieurs étapes que nous allons énumérer et qui ont toutes pour but de définir les variables indispensables à la réalisation ultérieure de l'intégration. Il est question des variables temporelles, puis de celles caractérisant la grille et son format, ensuite la création du fichier `AN` renfermant la physique composée des champs de surface, puis du pilotage et de ce que l'on appelle le « nesting » graduel dans l'éponge entre la topographie de la simulation pilote de grande échelle et celle de la nouvelle grille et pour finir l'interpolation verticale des coordonnées de pression en coordonnées Gal-Chen qui aboutit à la création du fichier `INMRC`. Les interpolations sont en effet faites à partir de ces coordonnées  $\zeta$  ou  $\epsilon$ , de la simulation de référence vers des coordonnées de pression et ensuite Gal-Chen qui suivent la topographie.

Si nous décrivons ici avec plus de détails comment est constitué le fichier `AN` relatif à la physique dans le cas des « simulations pollen », notons que le script `lance_pilomrc1` appelle le script `climsfc_pollen` qui se trouve dans `/home/climato/version/MRC_V3.6.1/scripts` et qui a pour objectif de générer `AN`. Il calcule les paramètres de grille sur les

points T. Pour cela il sélectionne les champs géophysiques contenus dans le fichier `LLPHYS` dont le chemin est précisé dans `PARAMETRES`. Il les passe en revue et les amène sur les points de grille du modèle. Pour y arriver il doit faire appelle à un premier exécutable que l'on trouve dans `/home/climato/version/MRC_V3.6.1/bin` s'appellant `initmrc`. Son but est de créer le fichier contenant les champs géophysiques de surface. Dans le cas des « simulations pollen », il manque encore les sources de pollen, qui sont à leur tour appelées par un autre script `prepaero.sh` qui crée le fichier des traceurs en appelant le répertoire `EMIS` se trouvant à l'adresse précisée dans `PARAMETRES` et dans celui-ci le module `emissions`. Ensuite, intervient un autre exécutable se trouvant à la même adresse que précédemment et s'appellant `initgeia` dont le rôle est d'interpoler les données pollen sur la grille PS du modèle. A l'horizontale, les coefficients spectraux sont convertis sur une grille gaussienne puis une interpolation est faite sur la grille régionale polaire stéréographique. Chaque variable est finalement décalée à l'endroit qui lui est propre selon la grille Arakawa C.

De retour dans le script `lance_pilomrc1`, nous appelons le masque terre/eau choisit dans le cadre de ces simulations en fonction de l'albédo de longues longueurs d'ondes ( $AL$ ) (voir section 3.2.3) auquel on a adjoint un champs de végétation (ambrosie) noté  $AC$  et se trouvant tous deux dans le fichiers `alplusambr` figurant lui-même dans le répertoire `EMIS`. L'exécutable qui effectue cette extraction est `rp113`, provenant des executables du modèle. Notons que  $AL$  varie dans la région à l'étude entre 6.8% et 56 % et  $AC$  entre -30 plants/m<sup>2</sup> et +60 plants/m<sup>2</sup>. Concernant la dynamique, il faut préciser que le « nesting » se fait progressivement dans l'éponge en initialisant d'abord les paramètres de grille puis en appelant les paramètres  $PHI$ ,  $TEMP$ ,  $U$ ,  $V$ ,  $SHUM$ , et  $SW$  successivement qui sont ensuite par le biais du script `pilmrc_cascade`, lissés pour s'ajuster à la nouvelle topo régionale et interpolés dans la verticale de coordonnées de pression en coordonnées Gal-Chen.

Finalement, en plus des trois fichiers `AN`, `INMRC` et `mrc_settings`, ce script génère trois répertoires dans lesquels sont archivés, dans `pres`, les données initiales pour le pilotage du modèle sur la grille décalée en coordonnées Gal-Chen ( $p$  pour pilote), dans `ires` les mêmes données mais en coordonnées de pression pour des points « T » d'une grille non décalée ( $i$  pour initial) et dans `zres` des fichiers nécessaires pour reproduire la simulation de même que de l'information pertinente sur cette simulation.

### A3.2-3 Exécution du MRCC-Pollen

Les deux étapes passées, compilation et préparation des données, composent ce que l'on appelle l'initialisation (*angl. pre processing*). Nous sommes alors prêts à démarrer une intégration. L'exécution de l'intégration est l'étape la plus coûteuse en temps de calcul. C'est pourquoi nous avons fait le choix de l'exécuter en lot à partir de la commande `batch`. Nous allons nous pencher sur les étapes de cette exécution. Précisons seulement auparavant que dans le cas d'un modèle numérique tel que celui que nous employons, la variation d'une quantité scalaire, ici le pollen ( $C_p$ ) est fonction d'un terme dynamique ( $D_p$ ) et d'un terme physique ( $P_p$ ) que nous pouvons noter ainsi :

$$\frac{\delta C_p}{\delta t} = D_p + P_p \quad \text{eq. 1}$$

Le pollen est traité comme un traceur passif transporté et soumis aux conditions météorologiques. Ainsi le terme dynamique englobe tout ce qui est relatif au transport horizontal tel que l'advection du pollen englobé dans le flux moyen alors que le terme physique regroupe les sources et puits de ce pollen. Ce second terme inclut les effets de processus qui, bien qu'agissant à des échelles plus petites que celles résolues par le modèle, ne sont cependant pas négligeables et ont au contraire une influence importante à plus grande échelle. Il est absolument indispensable d'inclure ces termes aux échelles résolues de manière à obtenir une simulation acceptable dans le temps et l'espace de l'évolution du pollen. C'est pourquoi nous pouvons décomposer ce terme de la physique selon l'eq.2 suivante :

$$P_p = P_{p,h} + P_{p,v} \quad \text{eq. 2}$$

Le terme  $P_{p,h}$  correspond à la diffusion horizontale, prescrite dans le MRCC et le terme  $P_{p,v}$  correspond à la diffusion verticale du pollen. Ce second terme est de prime importance dans cette étude. Elle correspond aux processus de sous échelle qui doivent être paramétrés afin d'être pris en compte afin de résoudre le mouvement vertical du pollen dans

l'atmosphère. Dans ce terme, entrent deux nouveaux termes qui sont, l'émission  $P_{em}$  et la déposition  $P_{dep}$  et que l'on peut noter ainsi:

$$P_{p,v} = P_{em} + P_{dep} \quad \text{eq. 3}$$

L'émission est en fait une représentation paramétrique des sources émettrices de pollen et la déposition représente en réalité, l'ensemble des processus entraînant l'élimination du pollen de l'air. Nous apportons des détails quant à ces processus d'émission dans la section 4.2.4. D'un point de vue purement informatique, la concentration de pollen est considérée de la même façon que les autres variables pronostiques que sont, la température de l'air, l'humidité et le vent. Les puits de pollen quant à eux sont représentés par les processus de déposition qui sont fonction d'un certain nombre de facteurs tels que le type de pollen, sa masse et ses dimensions, ses propriétés aérodynamiques et sa forme, la vitesse de vent, l'éventuelle intervention de précipitations. La dynamique des particules aéroportées impose un certain nombre de contraintes concernant le transport sur les longues distances. Les grandes particules telles que des grains de pollen tombent généralement en grand nombre à proximité de la source d'émission. Elles sédimentent alors sous l'effet de la gravité. Cependant, une petite quantité de ce pollen émis peut tout de même être injectée plus en altitude sous l'effet de la turbulence et des mouvements verticaux de l'air. Ces pollens ont alors de plus grandes chances de voyager sur de grandes distances. Ces processus de dispersion engendrent ce que l'on appelle le nuage pollinique que l'on peut caractériser comme étant la concentration de fond en pollen au-dessus d'une région particulière. Ainsi donc nous pouvons dire que l'avenir de ces quantités de pollen est fonction des conditions aérodynamiques de l'air et du pollen et du temps

de résidence du pollen dans l'air. Ce temps de résidence est modulé par la déposition sèche  $P_{ds}$  et la déposition humide

$P_{dh}$  que l'on peut écrire ainsi :

$$P_{dep} = P_{ds} + P_{dh} \quad \text{eq.4}$$

Le paramétrage de la déposition est assez rudimentaire dans le modèle. Elle se base sur une vitesse de déplacement vers le bas qui est prescrite en tenant compte des dimensions du pollen et de sa masse. La déposition humide peut également être invoquée sur demande.

Le MRC que nous employons est la version MRC-Pollen à laquelle sont couplés quelques modules de NARCM 3.1. On le trouve dans le répertoire RCS localisé à l'adresse suivante `/home/climato/version/MRC_V3.6.1/sources/modele/COUPLEUR_II/`. C'est à l'occasion de l'exécution de ce programme principal qu'est gérée la boucle temporelle. On trouve en début de programme le traitement préalable qui a pour but d'associer les fichiers aux unités logiques et de définir les constantes de la machine sur laquelle est faite l'intégration. Suit l'ouverture des fichiers, la lecture des conditions initiales, le calcul des constantes et des paramètres, les tests portant sur l'intégration séquentielle de même que sur le type d'initialisation utilisé. On définit ici le type de pilotage spectral (`ipipse`) de même que le profil du coefficient de pilotage spectral pour les différents niveaux. Ce pilotage a pour effet de guider en quelque sorte les grandes ondes du champ de masse qui est dans le MRCC le champ de vent de manière à bien reproduire la trajectoire réelle des dépressions. Ces informations sont extraites du fichier `mrc_settings` de même que les variables relatives au type de filtre employé ainsi que les coefficients permettant de pondérer l'efficacité du pilotage suivant la variable traitée. Le sous programme `stepdyn2` invoqué dans la boucle temporelle réalise le pas de temps de la partie dynamique des équations pronostiques ainsi que le pilotage. La correction relative au paramétrage de la physique et de la diffusion horizontale prescrite est quant à elle, effectuée par le sous programme `physics5`. Ce lissage des courtes longueurs d'onde que l'on appelle aussi *nudging*, atténue le bruit généré par l'intégration de l'ensemble de ces données. Enfin un filtre temporel est appliqué par l'intermédiaire du sous programme `tflt3`. Dans le cadre des simulations nous avons choisi de placer le premier niveau thermodynamique au centre de la couche comprise entre le sol et le premier niveau de *momentum*.

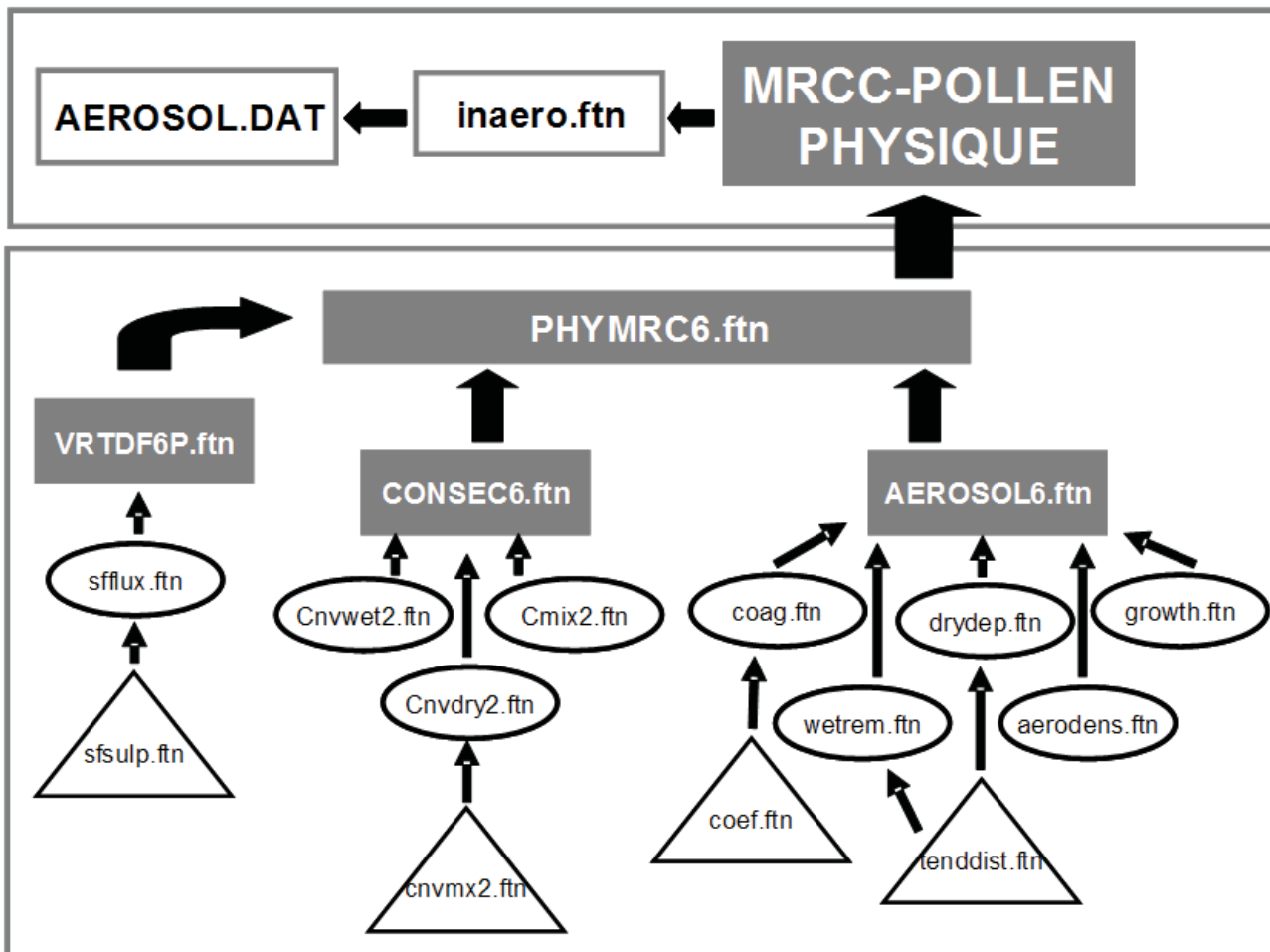
### A3.2-3.1 Physique du GCMii

L'appel de la physique du modèle se fait par l'intermédiaire du programme `GCMii.ptn,v`. Comme mentionné préalablement la physique englobe tous les processus traités en mode colonne qui interviennent entre autre dans les processus d'émission et d'élimination du pollen de l'atmosphère. Certains de ces processus appellent des modules développés pour NARCM. Le GCMii fait appel à un programme `inaero.ptn,v` qui lit toutes les propriétés concernant les aérosols. Ce programme se trouve à l'adresse `/home/climato/version/MRC_V3.6.1/sources/modele/COUPLEUR_II/RCS` et fait lui-même appel au fichier `AEROSOL.DAT` qui figure dans `/home/goyettej/bin/POLLEN`. Ce fichier alimente `inaero` en lui indiquant les clés de ce que l'on veut traiter avec le modèle. Il est présenté à la figure IV-3. Nous pouvons ainsi voir que nous avons décidé dans les simulations qui nous intéressent de considérer les modules d'aérosols, de traiter la déposition sèche, la turbulence et de faire en sorte que les sorties du modèle (émission et déposition) soient en concentration de masse, c'est-à-dire en  $\mu\text{g}$

de pollen/m<sup>3</sup> d'air. En revanche, déposition humide et la coagulation n'ont pas été retenues.

Une attention particulière à la description des modules de diffusion verticale qui permettent l'introduction du pollen dans le modèle ainsi qu'à ceux traitant de la déposition sèche favorisant son élimination. Ainsi après avoir appelé *inaero* qui va chercher l'information de nature cartographique des sources de pollen, le *GCMii* appelle la sous routine *phymrc6.ptn,v* se trouvant au même endroit que la précédente. Ce programme appelle tous les processus physiques intervenant dans le MRCC et notamment ceux ayant une influence sur les aérosols. Un organigramme présenté à la Figure A3.2-1 présente cette structure relativement complexe de laquelle on peut extraire l'information nous intéressant.

La physique du modèle fait appel à différents modules selon ce que l'on veut résoudre. Elle a pour objectif d'ajuster les variables thermodynamiques (température et humidité) par le biais de la diffusion verticale et de l'ajustement convectif. Elle accumule ensuite les tendances résultant de la diffusion verticale et des flux de surfaces ainsi que de l'ajustement convectif et de la radiation terrestre et solaire. Enfin, elle résout le bilan d'énergie à la surface ainsi que les équations du cycle hydrologique. On peut ainsi faire ressortir 3 principaux groupes de processus touchant de plus ou moins loin aux pollens. Ils sont, la diffusion dont le programme clé est *vrtdf6p.ptn,v*, la convection traitée par l'intermédiaire de *consec6.ptn,v* dans la version du modèle que nous employons mais qui correspond en fait à *convec6.ptn,v* ainsi que la physique des aérosols par le biais de *aerosol6.ftn,v* incluant entre autre la coagulation (*coag.ptn,v*) et la déposition sèche (*drydep.ptn,v*) et humide (*wetrem.ptn,v*).



Légende :

Texte blanc sur fond gris : modules existants dans le MRCC

Texte noir sur fond blanc : modules provenant de NARCM

Les flèches indiquent le sens de l'appel

Figure A3.2-1 : Organigramme simplifiée de la physique appelée à l'occasion des simulations pollen



Ainsi, la diffusion est appelée par le biais de `vrtdf6p.ftn,v`. Le but est de calculer les coefficients de diffusion verticale d'un certain nombre de quantités dont les traceurs. Pour cela il faut auparavant estimer des coefficients de friction à la surface (*angl. surface drag coefficients*). On calcule donc les flux de surface en appelant la sous routine `sflux.ftn,v` qui elle-même fait appel à différentes sous-routine dont une nous intéresse plus particulièrement. Il s'agit de `sfsulp.ftn,v`. Cette routine développée dans le cadre NARCM est normalement là pour estimer les émissions de sulfates dans l'atmosphère et calculer un peu de chimie *ad hoc*. On a intégré dans ce programme un calcul de flux de surface pour le pollen d'ambrosie. Ce calcul se fait en suivant l'éq.4. Un certain flux de pollen ( $F_p$ ) émis dans l'air est estimé en suivant une fonction tenant compte de la densité ( $N$ ) des plants par unité de surface ( $/m^2$ ), de la masse ( $m_0$ ) d'un grain de pollen (7.2 ng) et de l'émission ( $E(t)$ ) d'un plant en nombre de grains par unité de temps.

$$F_p = N \cdot m_0 \cdot E(t) \quad \text{eq. 5}$$

Le flux ainsi obtenu est mesuré en  $\mu m/m^3$  d'air. Cette fonction d'émission a été ajustée de manière à se calquer sur le cycle diurne de l'ambrosie réellement observé et très bien documenté dans la littérature (chapitre 2). De retour dans le programme de calcul de la diffusion verticale, il faut ensuite calculer les coefficients de cette diffusion verticale, puis déterminer le sommet de la couche limite atmosphérique, enfin calculer les tendances et raffiner les flux de surface. En dernier lieu on détermine les coefficients de diffusion des traceurs dans la verticale ainsi que ceux de la chaleur.

La convection qui est déterminante de la stabilité atmosphérique donc de la capacité de mélange des couches de plus ou moins basse altitude et de ce fait de la distribution et du devenir des pollens transportés aéroportés est donc traitée par l'intermédiaire de `consec6.ftn,v` qui a pour objet d'ajuster la convection sèche et humide dans le modèle, de calculer à la fois les précipitations de grande et petite échelle. Après un certain nombre de calculs permettant de contrôler la stabilité, on calcule le flux convectif ainsi que le mélange des traceurs en fonction du schéma convectif utilisé. Pour cela on appelle la sous routine `cmix2.ftn,v`. On calcule ensuite le flux d'humidité, puis suit le réchauffement stable ou convectif par condensation de même que les précipitations convectives ou stables. La prochaine étape est de caractériser la condensation au sommet de la couche de mélange en calculant les précipitations et leur distribution dans la couche. La dernière étape est d'assembler température et humidité spécifique pour caractériser cette couche convective et estimer le sommet de la tropopause en se basant sur le gradient de température. On fait alors appel à deux sous routines qui sont : `conwet2.ftn,v` et `condry2.ftn,v` qui calculent respectivement le mélange convectif humide et sec des traceurs contenus dans cette couche de mélange.

Suit ensuite la physique des aérosols, traitée par l'intermédiaire du programme `aerosol6.ftn,v`. Ce programme contrôle en fait l'ensemble des processus qui tendent à éliminer les particules de l'air. Ceux-ci comptent la déposition sèche, la déposition sous l'effet de la gravité ainsi que le lessivage à la fois dans et sous les nuages. Il fait pour cela appel à plusieurs modules successifs. Le premier concerne la croissance des aérosols ainsi que leur densité. Ensuite il est question de coagulation hétérogène. Dans le cas de ce module, les phénomènes d'oxydation du  $SO_2$  en  $SO_4$  sont pris en considération. Dans l'étude présente nous n'y faisons donc pas référence. On arrive ensuite à la coagulation et pour cela on appelle `coag.ftn,v`. Ce programme se base sur le schéma de coagulation de Gelbard *et al.* (1979) à partir de coefficients de coagulation pré calculés. Il calcule aussi la coagulation brownienne, turbulente et gravitationnelle. Par ailleurs la dépendance relative à la taille est explicitement calculée et la nature des aérosols est prise en compte. Dans le cas de nos expériences, nous n'avons pas activé ce module (figure 2-3). Parmi les processus traités vient ensuite la déposition humide. On appelle alors le programme `wetrem.ftn,v` qui calcule le taux de déposition humide en tenant compte du type d'aérosol. Nous n'avons pas considéré ce type de déposition dans nos expériences mais nous pouvons l'activer au besoin. Le programme évalue à la fois, la déposition sous le nuage, en faisant appel à une sous routine `blcld.ftn,v` qui considère le lessivage par les précipitations et celle ayant lieu au sein du nuage par l'intermédiaire de la sous routine `inclld.ftn,v` qui s'intéresse à la transformation des aérosols sous la forme de noyaux de condensation. Enfin, le dernier type de déposition considéré concerne la déposition sèche grâce au module `drydep.ftn,v`. Dans le cas présent étant donné que nous employons une vitesse terminale de sédimentation constante et égale, nous simplifions le processus et ne faisons que calculer la tendance d'élimination entre les couches du modèle.

Décortiquons ce module de déposition sèche en ce qui concerne le pollen. Lorsque l'on modélise la déposition sèche, on considère que le taux de déposition par unité de surface  $P_{ds}$  est proportionnel à la concentration à proximité de la surface

$C_p$ . On peut ainsi écrire,

$$P_{ds} = -V_s \cdot C_p(x,y,0) \quad \text{eq. 6}$$

où,  $v_s$  fait référence à la vitesse de déposition sèche. Cette vitesse inclut à la fois une part diffuse à laquelle on fait la plupart du temps référence en parlant simplement de déposition sèche et une autre part, qui correspond à l'effet de la gravité que l'on appelle aussi vitesse terminale de sédimentation. Ce taux de déposition ou ce flux, est négatif puisque dirigé vers le bas. Si l'on a par exemple une source de pollen qui émet en un point donné, au moment où on intègre ce qui se dépose, et que le flux émis vers le haut excède le flux gravitationnel, alors le flux se tourne vers le haut et devient positif au profit de l'émission. Ce qu'il faut bien comprendre est que la déposition à la surface tend à éliminer les pollens de la base du nuage. La concentration de ce nuage se comble alors soit par diffusion horizontale à partir d'une source proche ou encore par diffusion verticale dirigée vers le bas à partir d'un réservoir se situant plus haut, tel que l'atmosphère elle-même agissant comme telle. La diffusion permet alors le transfert de particules dans la couche limite atmosphérique et là, elles se déposent à leur tour essentiellement sous l'effet de la gravité. C'est pourquoi, à proximité de la surface lorsque l'on estime la vitesse du flux de déposition d'une quantité  $x$  de pollen, on l'approxime avec justesse par la vitesse terminale de sédimentation telle que définie par Stokes. En fait dans la couche limite atmosphérique la turbulence permet le déplacement des pollens dans la verticale mais à proximité de la surface c'est essentiellement la gravité qui intervient (Gregory, 1973). Ce qui confirme l'écriture de l'eq.5 telle quelle. Dans le modèle, la déposition sèche est traitée selon

le schéma proposé par Giorgi (1986). La vitesse de sédimentation est fixe et sa valeur est  $v_s = 1.56 \cdot 10^{-2}$  m/s. On écrit alors :

$$QCC = -v_s \cdot 2 \frac{\Delta t}{Z_L} \quad \text{eq. 7}$$

où,  $\Delta t$  est le pas de temps choisi en secondes et  $Z_L$  l'épaisseur de la couche considérée. D'après le schéma appelé dans `drydep.f`, le flux de déposition sèche s'écrit ainsi :

$$P_{ds} = C_{p(x,y,0)} \cdot \frac{\exp(QCC) - 1}{2\Delta t} \quad \text{eq. 8}$$

Ce qui revient à dire comme Gregory (1945) que la quantité de pollen qui demeure en suspension au dessus d'un point donné après déplacement du cœur du nuage d'une distance  $x$ , décroît de manière exponentielle avec la distance.

### A3.2-3.2 Dynamique de MC2

La dynamique appelée dans le MRCC provient de MC2 et est caractérisée par un schéma numérique de transport des traceurs semi implicite et semi Lagrangien. Elle est composée des équations d'Euler, élastiques et non hydrostatiques. Le pilotage se fait de façon unidirectionnelle. Les vents horizontaux  $U$  et  $V$  de même que la température de l'air, la vapeur d'eau et la pression sont imposés aux frontières latérales. Il est question avec la dynamique de traiter les processus d'advection, donc le transport horizontal des différentes quantités dont les traceurs.

### A3.2-3.3 Sorties du modèle et diagnostics

En cours d'intégration, le MRCC-Pollen génère un certain nombre de fichiers dont `OUTMRC` qui est le plus gros car il contient les données archivées. Afin de fragmenter une intégration de manière à la rendre moins lourde ce qui a été fort utile dans le cas de ce travail, `NEWDYRS` permet de redémarrer la dynamique et `NEWRS` le redémarrage de la physique. Nous l'avons exploitée afin de réaliser des simulations de 35 jours à 1km. Dans ce cas là, il faut renommer les fichiers `OLDDYRS` par `NEWDYRS` et `OLDRS` par `NEWRS`, éditer un nouveau fichier `PARAMETRES` dans lequel nous ajustons correctement les paramètres de temps afin de poursuivre l'intégration, produire de nouveaux fichiers d'entrée et de pilotage à l'aide de `lance_pilomrc` et enfin relancer l'intégration. L'intégration complétée, la phase qui suit est celle des diagnostics.

Cette cinquième et dernière étape permet de décompacter les sorties telles que la pression de l'air, la température, le vent, l'humidité, les précipitations, l'évaporation, l'humidité du sol, issues de la simulation en coordonnées de modèle c'est à dire discrétisées sur une grille entrelacée de type Arakawa C, en projection polaire stéréographique à l'horizontale et en coordonnées verticales dites de Gal-Chen (Gal-Chen et Somerville, 1975) et de les traduire en coordonnées de pression. La première étape indispensable des diagnostics est la fragmentation de `OUTMRC` en fichiers de plus petite taille que l'on réalise dans un répertoire que l'on nomme `mres` à partir de la commande `split_all INPUT=OUTMRC OUTPUT=./res/`



### ANNEXE 3.3 : FACTEURS MÉTÉOROLOGIQUES ET POLLINIQUES MESURÉS DANS LE MRCC-POLLEN

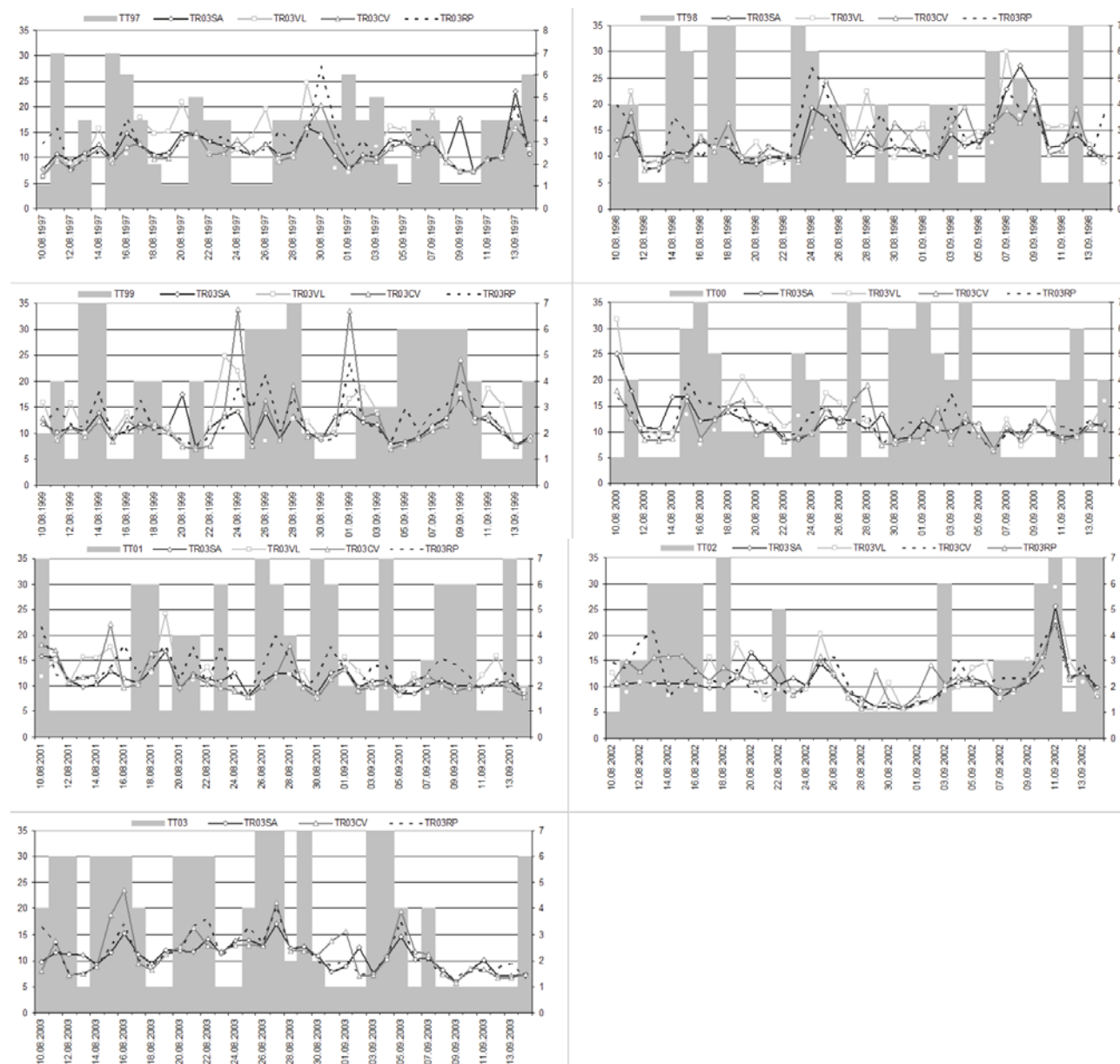
#### A3.3-1 Paramètres météorologiques

<i>Variables</i>	<i>Etiquettes CCCma</i>	<i>Niveaux diagnostiques</i>	<i>Description</i>	<i>Unité</i>
<i>allw</i>	<i>ALLW</i>	<i>1</i>	<i>Albédo de surface dans l'IR</i>	<i>%</i>
<i>phis</i>	<i>PHIS</i>	<i>1</i>	<i>Géopotentiel de surface</i>	<i>m</i>
<i>fsg</i>	<i>FSG</i>	<i>1</i>	<i>Flux solaire absorbé par surface</i>	<i>W.m<sup>-2</sup></i>
<i>temp</i>	<i>TEMP</i>	<i>25</i>	<i>Température</i>	<i>°C</i>
<i>st</i>	<i>ST</i>	<i>1</i>	<i>Température niveau abri</i>	<i>°C</i>
<i>rhum</i>	<i>RHUM</i>	<i>25</i>	<i>Humidité relative</i>	<i>%</i>
<i>sq</i>	<i>SQ</i>	<i>1</i>	<i>Humidité spécifique niveau abri</i>	<i>g.kg<sup>-1</sup></i>
<i>sqmn</i>	<i>SQMN</i>	<i>1</i>	<i>H spécifique min niveau abri</i>	<i>g.kg<sup>-1</sup></i>
<i>sqmx</i>	<i>SQMX</i>	<i>1</i>	<i>H spécifique max niveau abri</i>	<i>g.kg<sup>-1</sup></i>
<i>u</i>	<i>U</i>	<i>25</i>	<i>Vent réel selon x</i>	<i>m.s<sup>-1</sup></i>
<i>su</i>	<i>SU</i>	<i>1</i>	<i>Vent réel à 10 mètres</i>	<i>m.s<sup>-1</sup></i>
<i>v</i>	<i>V</i>	<i>25</i>	<i>Vent réel selon y</i>	<i>m.s<sup>-1</sup></i>
<i>sv</i>	<i>SV</i>	<i>1</i>	<i>Vent réel à 10 mètres</i>	<i>m.s<sup>-1</sup></i>
<i>w</i>	<i>W</i>	<i>25</i>	<i>Vitesse verticale réelle</i>	<i>m.s<sup>-1</sup></i>
<i>pnm</i>	<i>PMSL</i>	<i>25</i>	<i>Pression au niveau moyen de la mer</i>	<i>hPa (mb)</i>
<i>ps</i>	<i>PO</i>	<i>1</i>	<i>Pression de surface</i>	<i>hPa (mb)</i>

#### A3.3-2 Paramètres polliniques

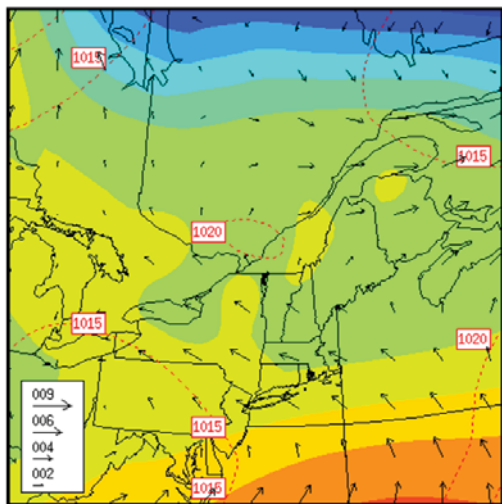
<i>Variables</i>	<i>Etiquettes CCCma</i>	<i>Niveaux diagnostiques</i>	<i>Description</i>	<i>Unité</i>
<i>p1sf01</i>	<i>SF01</i>	<i>1</i>	<i>Emission de pollen insulaire</i>	<i>grs/m<sup>2</sup>/s</i>
<i>p1sf02</i>	<i>SF02</i>	<i>1</i>	<i>Emission de pollen extra insulaire</i>	<i>grs/m<sup>2</sup>/s</i>
<i>pptr01</i>	<i>TR03</i>	<i>25</i>	<i>Concentration de pollen insulaire</i>	<i>kg/m<sup>3</sup> d'air</i>
<i>pptr02</i>	<i>TR04</i>	<i>25</i>	<i>Concentration de pollen extra insulaire</i>	<i>kg/m<sup>3</sup> d'air</i>
<i>p1dr01</i>	<i>DR05</i>	<i>1</i>	<i>Dépôt de pollen insulaire</i>	<i>grs/m<sup>2</sup>/s</i>
<i>p1dr02</i>	<i>DR06</i>	<i>1</i>	<i>Dépôt de pollen extra insulaire</i>	<i>grs/m<sup>2</sup>/s</i>
<i>p1sf03</i>	<i>SF10</i>	<i>1</i>	<i>Emission totale de pollen (sf01+sf02)</i>	<i>grs/m<sup>2</sup>/s</i>
<i>pptr03</i>	<i>TR11</i>	<i>25</i>	<i>Concentration totale de pollen (tr03+tr04)</i>	<i>kg/m<sup>3</sup> d'air</i>
<i>p1dr03</i>	<i>DR12</i>	<i>1</i>	<i>Déposition totale de pollen (dr05+dr06)</i>	<i>grs/m<sup>2</sup>/s</i>

### ANNEXE 3.4 : COURBES DES CONCENTRATIONS POLLINIQUES SIMULÉES AU QUATRE POINTS DE MESURE ET TYPES DE TEMPS ASSOCIÉS

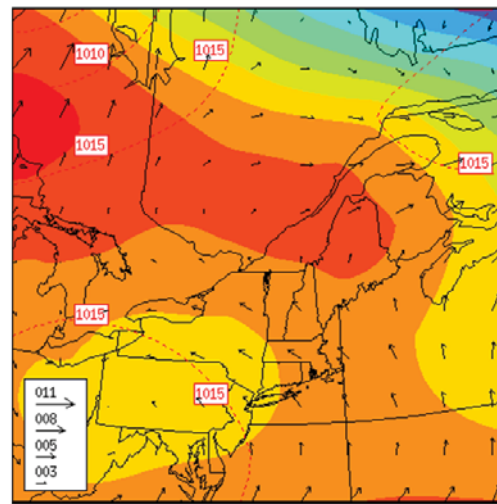




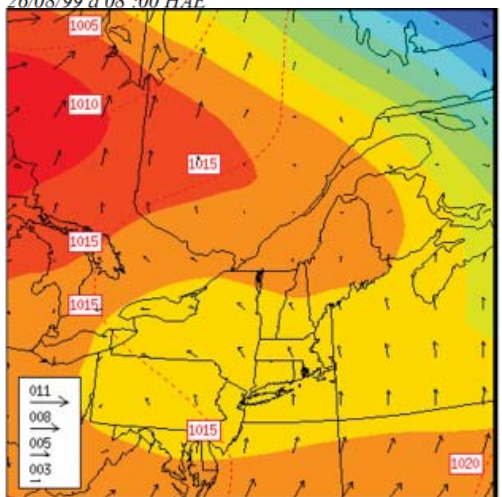
ANNEXE 3.5 : SITUATION SYNOPTIQUE DES 26 - 28 AOÛT 1999



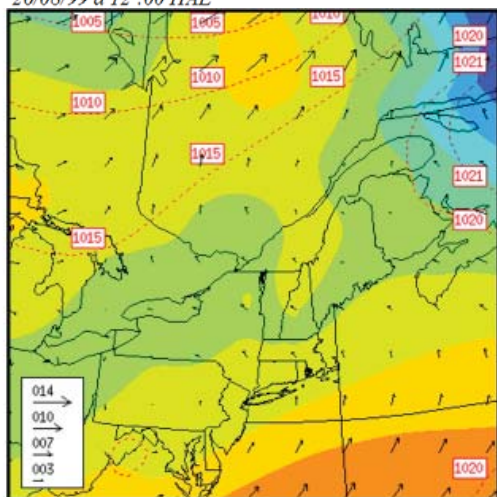
26/08/99 à 08 :00 HAE



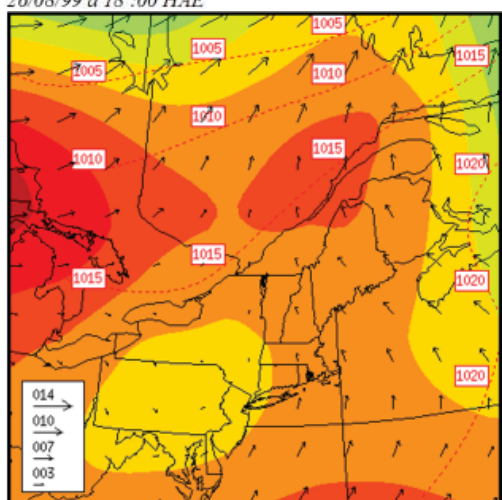
26/08/99 à 12 :00 HAE



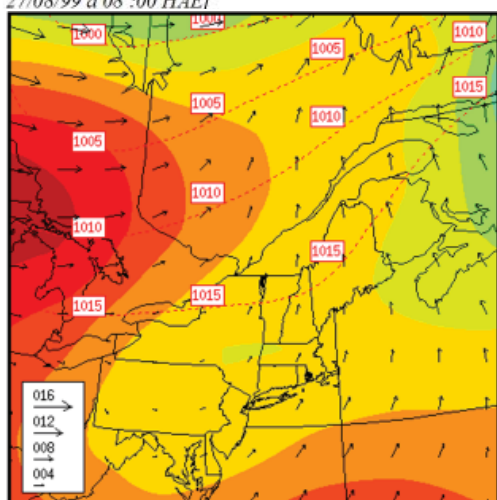
26/08/99 à 18 :00 HAE



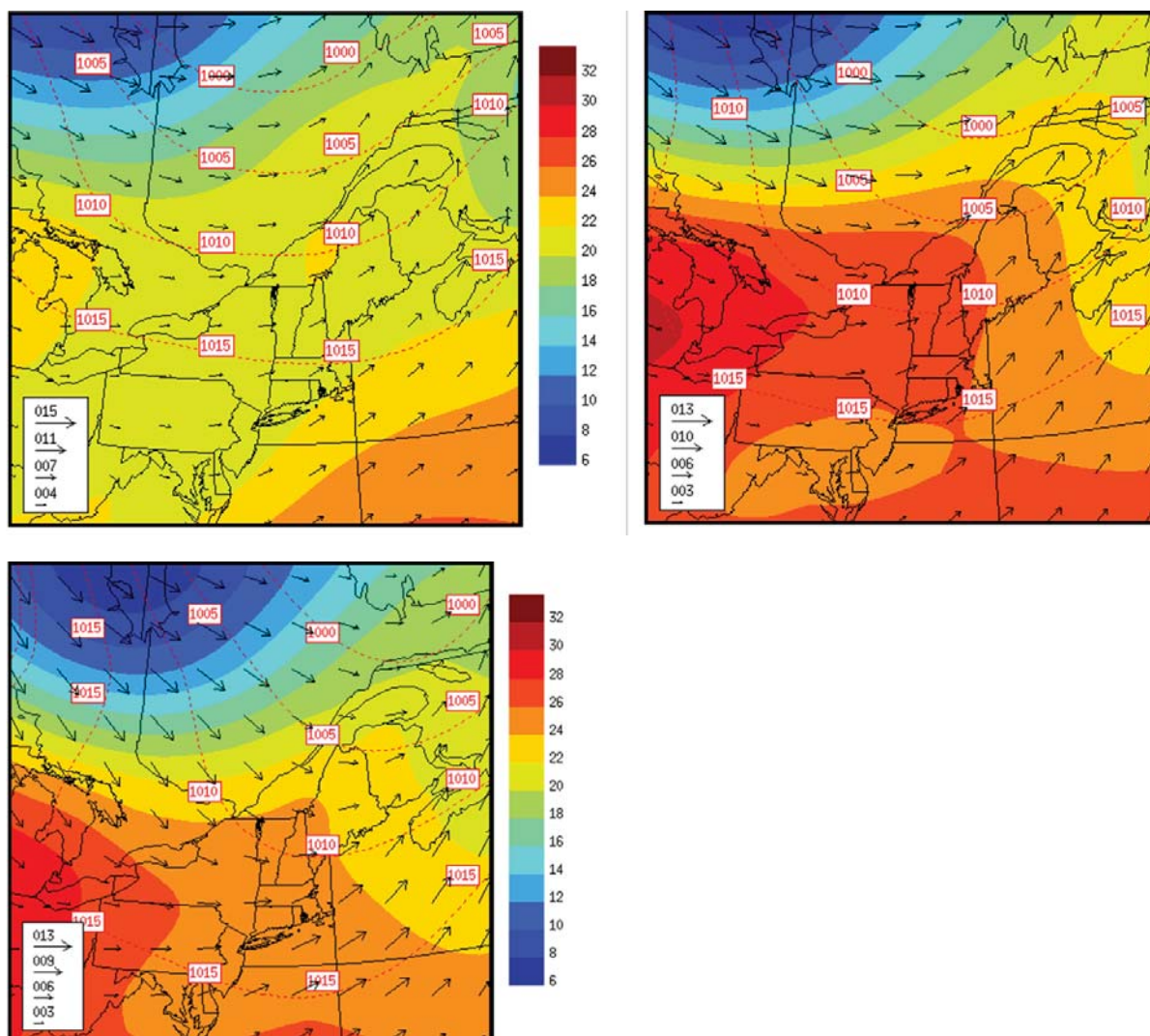
27/08/99 à 08 :00 HAE



27/08/99 à 12 :00 HAE



27/08/99 à 18 :00 HAE



28/08/99 à 18 :00 HAE

Le font illustre le champ de température de l'air (°C) à 1000 mb, les flèches indiquent le sens du vent et leur taille fournit une indication de sa vitesse (m/s). Les pointillés rouges correspondent à la pression barométrique (en mb).



## BIBLIOGRAPHIE

## BIBLIOGRAPHIE

## 1.1. Monographies, rapports, études et articles

- Adams-Groom, B., Emberlin, J., Corden, J., Millington, W. and Mullins, J. (2002) Predicting the start of the birch pollen season at London, Derby and Cardiff, United Kingdom, using a multiple regression model, based on data from 1987 to 1997. *Aerobiologia* 18: 117-123
- Adrian, G. and Fiedler, F. (1991) Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations. *Contr. Phys. Atmos.* 64 : 27-48
- Alcázar, P. and Comtois, P. (2000) The influence of sampler height and orientation on airborne *Ambrosia* pollen counts in Montreal. *Grana* 39: 303-307
- Armentia, A., Asension, T., Subiza, J., Arranz, M. L., Martín Gil, F.-J. and Callejo, A. (2004) Living in towers as risk factor of pollen allergy. *Allergy* 59: 302-305
- Arritt, R. W., C. A. Clark, J. M. Riese and M. E. Westgate (2004) Lagrangian numerical simulations of maize pollen dispersion and comparison with observations. Submitted to *International Journal of Biometeorology*
- Arritt, R. W., Westgate, M. E., Clark, C. A., Fonseca, A. and Riese, J. M. (2003) Development of an adventitious pollen risk assessment model. Abstract in: GMCC-03, 1<sup>st</sup> European Conference on the Co-existence of Genetically Modified Crops with Conventional and Organic Crops
- Arritt, R., Clark, C. A., Westgate, M. E. and Goggi, A. S. (2002) Numerical simulations and field studies of maize pollen dispersion. Abstract in: 16<sup>th</sup> *Biometeorology and Aerobiology*, American Meteorological Society, Vancouver, B.C., Canada
- Asselin S., Bachand, S., Christin, C. et Bonvalot, Y. (1998) Liens entre les pollens allergènes, leur mesure et les symptômes ressentis. Direction de la santé publique. Régie régionale de la santé et des services sociaux de Montréal-centre. Santé au travail et environnementale
- Bachisio, A., Pellizzaro, G., Canu, A. and Vargiu, A. (2004) Use of neural networks to short-term forecast of airborne pollen data. 16th *Biometeorology and Aerobiology*. American meteorological society, Vancouver, B.C., Canada
- Bailey, W. G., Oke, T. R. and Rouse, W. R. Editors (1997) *The surface climates of Canada*. McGill-Queen's University Press, Montreal
- Banken, R. et Comtois P. (1990) Concentration du pollen de l'herbe à poux et prévalence de la rhinite allergique dans deux municipalités des Laurentides. *Allergie et immunologie* 24 (3) 91-94
- Bass, D. J., Delpech, V., Beard, J., Bass, P. and Walls, R. S. (2000) Ragweed in Australia. *Aerobiologia* 16 : 107-111
- Basset, I. J. and Crompton, C. W. (1975) The biology of canadian weeds. 11. *Ambrosia artemisiifolia* L. and *A. psilostachya* DC. *Canadian Journal of Plant Science* 55: 463-476
- Beggs, P. J. (2004) Impacts of climate change on aeroallergens: past and future. 34 : 1507-1513
- Behrendt, H., Krämer, U., Schäfer, T., Kasche, A., Eberlein-König, B., Darsow, U. and Ring, J. (2001) A research concept to study the role of environmental pollutants in allergy. *Allergy and Clinical Immunology International. Journal of WMO*. 13 (3) 122-128
- Belmonte, J. and Canela, M. (2002) Modelling aerobiological time series. Application to *Urticaceae*. *Aerobiologia* 18 : 287-295
- Belmonte, J., Vendrell, M., Roure, J. M., Vidal, J., Botey, J. and Cadahia, À. (2000) Levels of *Ambrosia* pollen in the atmospheric spectra of Catalan aerobiological stations. *Aerobiologia* 16 : 93-99
- Bergeron, G., Laprise, R and Caya, D. (1994) The numerical formulation of MC<sup>2</sup>, le mesoscale community compressible model, CCRM report, pp. 165
- Bianchi, D. E., Schwemmin, D. J. and Wagner, W. H. Jr. (1959) Pollen release in the common ragweed (*ambrosia artemisiifolia*). *Bot. Gaz.* 4: 229-43
- Biner, S., Caya D., Laprise R. and Spacek L. (2000) Nesting of RCMs by imposing large scales. Research activities in Atmospheric and Oceanic Modelling, edited by H.Richie, WMO/TD - No. 987, Report 30: 7.3-7.4
- Boer, G.J. and McFarlane, N. A. (1979) The AES atmospheric general circulation model. Report of the JOC study Conference on Climate Models: Performance, Intercomparaison and Sensitivity Studies, Vol.



1, GARP Publ. Ser. 22: 409-460

Boer, G. J., McFarlane, N. A., Laprise, R. Henderson, J. D. and Blanchet, J. P. (1984) The Canadian Climate Centre spectral atmospheric general circulation model. *Atmos-Ocean* 22: 397-429

Boer, G. J., McFarlane, N. A. and Lazare, M. (1992) Greenhouse gas-induced climate change simulated with the CCC second-generation general circulation model, *J. Climate* 5: 1045-1077

Bonvalot, Y. (1997) Réseau de surveillance aérobiologique et modèles prévisionnels. Revue de la littérature. Santé au travail et environnementale. Régie Régionale de la Santé et des Services Sociaux de Montréal-Centre. Direction de la Santé Publique

Borra, J.-P., Goldman, A., Goldman, M., Roos, R. A. and Sutra, J.-P. (1992) Mesures polliniques, météorologiques et électriques en atmosphère non urbaine. *Climat et santé* 8 : 67-87

Bourgeois, J. C.; Koerner, R. M. and Alt, B. T. (1985) Airborne pollen: a unique mass tracer, its influx to the Canadian high arctic. *Ann. Glaciol.* 7: 109-116

Bryant, R. B., Emberlin, J. C. and Norris-Hill, J. (1989) Vertical variation in pollen abundance in North-Central London. *Aerobiologia* 5: 123-137

Buck, P. and Levetin, E. (1982) Weather patterns and ragweed pollen production in Tulsa, Oklahoma. *Annals of Allergy* 49 (5) 272-5

Cabezudo, B., Recio, M., Sanchez-Laulhé, J. M., Del Mar Trigo, M., Toro, F. J. and Polvorinos, F. (1997) Atmospheric transportation of marijuana pollen from North Africa to the Southwest of Europe. *Atmospheric Environment* 31 (20) 3323-3328

Cakmak S., Dales, R. E., Burnett, R. T., Judek, S., Coates, F. and Brook, J. R. (2002) Effect of airborne allergens on emergency visits by children for conjunctivitis and rhinitis. *The Lancet*, vol. 359

Campbell, I. D., McDonald, K., Flannigan, M. D. and Kringayark, J. (1999) Long-distance transport of pollen into the Arctic. *Nature* 399: 29-30

Carosso, A. and Gallezio, M. T. (2000) Allergy to ragweed: clinical relevance in Turin. *Aerobiologia* 16 : 155-158

Castellano-Méndez, M., Aira, M. J., Iglesias, I., Jato, V. and González-Manteiga, W. (2005) Artificial networks as a useful tool to predict the risk level of *Betula* pollen in the air. *Int J Biometeorol* 49 : 310-316

Caya, D., and R. Laprise, (1999) A Semi-Implicit semi Lagrangian Regional Climate Model: the Canadian RCM. *Mon. Wea. Rev.* 127 : 341-362

Caya, D., Laprise, R., Giguère, G., Bergeron, G., Blanchet, J. P., Stocks, B. J., Boer, G. J. and McFarlane, N. A. (1995) Description of the Canadian regional climate model. *Water, Air and Soil Pol.* 82 : 477-

482

Cecchi, L., Morabito, M., Domeneghetti, P. M., Crisci, A., Onorari, M. and Orlandini, S. (2006) Long distance transport of ragweed pollen as a potential cause of allergy in central Italy. *Ann Allergy Asthma Immunol.* 96 (1) 86-91

Changnon, S. A. (1978) Urban effects of severe local storms. *Journal of Applied Meteorology* 17 : 578

Chappard, C., Bonneval, J., Colson, M., Mathern, G. and Emonot, A. (2004) Forecast of pollination dates and relation to onset of allergic pathology. *Aerobiologia* 20 : 35-42

Chatigny, M. A., Dimmick, R. L. and Mason, C. J. (1979) Atmospheric transport. In: *Aerobiology. The Ecological Systems Approach*. Ed. Edmonds, R. L. Dowden, Hutchinson and Ross. Inc.

Chatigny, M. A., Dimmick, R. L. and Harrington, J. B. (1979) Deposition. In *Aerobiology. The ecological systems approach*. Edited by Edmonds, R. L. Dowden, Hutchinson and Ross, Inc.

Christin, C. (2003) Augmentation de la quantité de pollen sur l'île de Montréal. Le Flash Herbe à Poux. Bulletin d'information, 4 (3) septembre 2003

Christin, C. et Mazur, R. (1994) État de la situation sur l'herbe à poux dans l'île de Montréal. Rapport étude. 42 pages. ISBN 2-921740-10-9

Clot, B. (2003) Trends in airborne pollen: An overview of 21 years of data in Neuchâtel (Switzerland). *Aerobiologia* 19 : 227-234

Clot, B. (2005) back trajectory model and ragweed. Wengen 2005

Coates, F., Yang W., Cakmak S. (2002) A Comparison of Aeroallergens Collected at Sites in Ottawa and Two Other Canadian Cities, *Journal of allergy and clinical immunology* 7 : 13-20

Cohart, E. M. and Kandle R. P. (1959) The effect of a ragweed pollen control program on ragweed pollen counts, *Journal of Allergy* 30 (4) 287-298

Cohart, E. M. and Kandle R. P. (1959) The effect of a ragweed pollen control program on hay fever. *Journal of Allergy* 30 (4) 299-310

Cole, A. L. and Harrington, J. B. Jr (1967) Atmospheric dispersion of ragweed pollen. *Journal of the Air Pollution Control Association* 17 (10) 654-656

Collins, L. (1990) La distribution de l'herbe à poux sur l'île de Montréal. Quatre temps : le bulletin de la société d'animation du jardin et de l'institut botaniques de Montréal 14 (3) 22-25

Comtois, P., Syzdeck, L., Kuehne, E. and Beccera Acosta, E. (2006). Ragweed autoecology and its implication as a pollen source. Abstract in "Towards a comprehensive vision", 8th International Congress on Aerobiology, Neuchâtel, Switzerland 21-25 August 2006



- Comtois, P. (2000) The gamma distribution as the true aerobiological probability density function (PDF). *Aerobiologia* 16: 171-176
- Comtois, P. (1998) Ragweed (*Ambrosia* sp.): the phoenix of allergophytes. In: Spieksma FT (ed) Satellite Symposium Proceedings: Ragweed in Europe. 6<sup>th</sup> International Congress on Aerobiology, Perugia, Italy. Alk-Abello, Horsholm: 3-5
- Comtois, P. (1997) Pollen dispersal and long distance transport: the case of thermophilic pollen in subarctic Canada. *Aerobiologia* 13: 37-42
- Comtois, P. (1995) Aérobiologie de l'herbe à poux. Rapport d'expertise. Département de Géographie, Université de Montréal. pp.14
- Comtois P. (1995) Rapport d'expertise dans le cadre du recours collectif – Nadon, Ville d'Anjou et autres, daté du 20 avril 1995 (site: <http://www3.sympatico.ca/alarie/ambrosia/expert1.htm>)
- Comtois, P. and Boucher, S. (1995) Ragweed phenology. in *Aerobiology*. Lewis Publishers
- Comtois, P. and Sherknies, D. (1992) Le pollen de l'ambrosie (*ambrosia artemisiifolia* L.): prévisions et prévention. *Allergie et immunologie* 24 (1) 22-25
- Comtois, P. and Sherknies, D. (1991) Pollen curves typology. *Grana* 30: 184-189
- Comtois, P. et Gagnon L. (1990) La biologie du pollen de l'herbe à poux. *Quatre-temps, SAGIB* 14 (3)
- Comtois, P. et L. Gagnon (1988) Concentration pollinique et fréquence des symptômes de pollinose : méthode pour déterminer les seuils cliniques. *Revue Française d'Allergologie* 28 (4) 279-286
- Comtois, P. and Sherknies, D. (1987) An aerobiological model for pollen forecasting. In: 18<sup>th</sup> conference on agricultural and forest meteorology and 8<sup>th</sup> conference on biometeorology and aerobiology, Sept. 14-18, 1987. Published by the American Meteorological Society, Boston, Mass.
- Comtois, P. (1983) Représentation pollinique actuelle à Lanoraie (Québec) et méthodologie de l'analyse pollinique. *Canadian Journal of Botany* 61: 1510-1521
- Cosson, L. (2002) Progression de l'envahissement de l'ambrosie en Ardèche et en Drôme : la lutte est-elle possible ? *Revue française d'allergologie et d'immunologie clinique* 42: 748-749
- Cotos-Yáñez, T. R., Rodríguez-Rajo, F. J. and Jato, M. V. (2004) Short-term prediction of *Betula* airborne pollen concentration in Vigo (NW Spain) using logistic additive models and partially linear models. *Int J Biometeorol*, 48: 179-185
- Coutinot, D. (2004) Faisabilité d'une lutte biologique contre une exotique de santé publique, l'ambrosie, *ambrosia artemisiifolia*. Contribution à « la Lutte Biologique : Réalité ou Volonté » Agropolis, Montpellier (13/10/2004)
- Dahl, A., Strandhede, S.-O. and Wihl, J.-A. (1999) Ragweed – An allergy risk in Sweden? *Aerobiologia* 15: 293-297
- Daley, R., Girard, C., Henderson, J. and Simmons, I. (1976) Short-term forecasting with a multi-level spectral primitive equation model. Part I – Model formulation. *Atmosphere* 14: 98-116
- D'Amato, G. (2002) Environmental urban factors (air pollution and allergens) and the rising trends in allergy respiratory diseases. *Allergy*. 57 (72) 30-33
- D'Amato, G., Spieksma, F. T. M., Liccardi, G., Jager, S., Russo, M., Kontou-Fili, K., Nikkels, H., Wuthrich, B. and Bonini S. (1998) Pollen-related allergy in Europe. *Allergy : European Journal of Allergy and Clinical Immunology* 53 (6) 567-578
- Damialis, A., Gioulekas, D., Lazopoulou, C., Balafoutis, C. and Vokou, D. (2005) Transport of airborne pollen into the city of Thessaloniki : the effects of wind direction, speed and persistence. *Int. J. Biometeorol.* 49: 139-145
- Davies, R. J., Rusznak, C. and Devalia, J.-L. (1998) Why is allergy increasing? - environmental factors *Clinical & Experimental Allergy* 28 (6) 8-14
- Davies, R. R. and Smith, L. P. (1973) Forecasting the start and severity of the hay fever season. *Clin Allergy* 3: 263
- Davies, R. R. (1969) Climate and topography in relation to aero-allergens at Davos and London. *Acta Allergol.* 24: 396-409
- Davies, R.R. (1965) Pollen and fungal spores in the city atmosphere. *Acta Allergol.*; 20; ISSN: 508
- Deblaere, J. C. (1987) Météorologie et dissémination des pollens. *Allergie et Immunologie* 16 (5) 283-285
- Déchamp, C., Caussanel, J.-P., Philippe, M. et Séverin, F. (2002) Moyens de lutte et stratégie générale dans Ambrosises : polluants biologiques. ARPPAM-Edition, Lyon (France)
- Déchamp, C. et Méon, H. (2002) Ambrosies – Polluants biologiques. Collection « L'homme et ... » ARPPAM-Edition, Lyon (France)
- Déchamp, C. et Penel, V. (2002) Bilan des comptes polliniques de l'année 2001, du réseau de surveillance Ambrosie Rhône-Alpes (SARA). *Revue française d'allergologie et d'immunologie clinique* 42: 539-542
- Déchamp, C. (1995) L'ambrosie: un nouveau fléau. Ed. Verso, Ahum, pp. 94
- Davies, rusznak et devalia information au public. *Allergie et immunologie* 24 (1) 17-21

- Delabays, N., Lambelet, C., Jeanmonod, D., Keimer, Ch., Clot, B. (2002) L'ambrosie à feuille d'armoise (*Ambrosia artemisiifolia*) : Une espèce à surveiller en Suisse. *Revue suisse d'Agriculture* 34 (1)
- Deloraine, A. et Rouvière, F. (2000) Place de l'allergie due à l'ambrosie parmi les pollinoses en Rhône-Alpes. Etude inscrite dans le cadre des réflexions sur le Plan régional pour la qualité de l'air en Rhône-Alpes. Etude réalisée par le CAREPS (Centre Rhône-Alpes d'Epidémiologie et de Prévention Sanitaire). Mandat du Conseil Régional Rhône-Alpes, de la CIREI Rhône-Alpes Auvergne, de la Communauté Urbaine du Grand-Lyon et de la DRASS (site : <http://rhone-alpes.sante.gouv.fr/sante/enviromn/acrobat/ambrosi.pdf>)
- Denis, B., Laprise R. and Caya D. (2003) Sensitivity of a Regional Climate Model to the spatial resolution and temporal updating frequency of the lateral boundary conditions. *Clim. Dyn.* 20: 107-126
- Dexheimer, D. N. and Bowman, K. (2004) Lagrangian methods for climatological analysis of regional atmospheric transport. *Journal of Applied Meteorology* 43: 623-629
- Diaz-Sanchez, D., Penichet-Garcia, M. and Saxon, A. (2000) Diesel exhaust particles directly induce activated mast cells to degranulate and increase histamine levels and symptom severity. *Journal of Allergy and Clinical Immunology* 106 (3) 1140-1146
- Dickerson, C. T. Jr. And Sweet, R. D. (1971) Common ragweed ecotypes. *Weed science* 19 ( 1) 64-66
- Dickinson, R. E., Errico, R. M., Giorgi, F and Bates, G. T. (1989) A Regional Climate Model for the Western United States. *Clim. Change* 15 : 383-422
- Dingle, A. N., Gill, G. C., Wagner, W. H., Jr and Hewson, E. W. (1959) The Emission, Dispersion and Deposition of Ragweed Pollen. *Advances in Geophysics* 6: 367-387
- Dingle, A. N. (1957) Meteorological considerations in ragweed hay fever research. *Fed.Proc.* 16: 615.
- Domingues-Vilches, E., Cariñanos, P., Galan Soldevilla, C., Guerra Pasadas, F., Infante Garcia-Pantaleon, F. and Villamandos de la Torre, F. (1995) Airborne pollen concentrations solid particles content in the air and allergy symptoms in Cordoba (Spain). *Aerobiologia* 11: 129-135
- Draxler, R. R. and Hess, G. D. (1998) An overview of the HYSPLIT\_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Australian Meteorological Magazine* 47: 295-308
- Durand, L. (1986) Description du contenu pollinique atmosphérique de Montréal et de Québec pour les années 1983 et 1984. Mémoire de M. Sc., Université de Montréal
- Dytham, C. (1999) Choosing and using statistics. A biologist's guide. Blackwell Science. pp. 218
- East, C. (1968) Comparaison du rayonnement solaire en ville et à la campagne. *Cahiers de Géographie*, Québec, 25: 81-9
- Edmonds, R. L. (1979) *Aerobiology – The ecological systems approach*. US/IBP synthesis series 10. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc.
- Emanuel, M. B. (1988) Hay fever, a post-industrial revolution epidemic: a history of its growth during the 19th century. *Clin Allergy* 18: 295-304
- Emberlin, J. and Norris-Hill, J. (1996) The influence of wind speed on the ambient concentrations of pollen from Gramineae, *Platanus* and *Betula* in the air of London, England. In: Muilenberg M. and Burge, H. (eds) *Aerobiology*. Lewis, Boca Raton, Fla. 27-38
- Emberlin, J. (1995) Interaction between air pollutants and aeroallergens. *Clinical and experimental allergy* 25 (suppl. 3) 33-39
- Emberlin, J. (1994) The effects of patterns in climate and pollen abundance on allergy. *Allergy* 49 (18) 15-20
- Emberlin, J. (1994) Mechanisms of atmospheric transport. *Advanced Aerobiology Course*. Cordoba, Spain. April 1994. Edited by Ariatti, A. and C. Galan
- Emberlin J. (1994) *Advanced Aerobiology Course*. Cordoba, Spain
- Emberlin, J., Norris-Hill, J. and Bryant, R. (1990) A calendar for tree pollen in London. *Grana* 29: 301-309
- Epstein, P. R. and Rogers, C. (2004) Inside the greenhouse: the impacts of CO<sub>2</sub> and climate change in the inner city. Boston, Mass. Center for Health and the Global Environment. Epstein P. R. and Rogers, C. eds
- Farham, J. E., Mason, D., Batchelder, G. L. and Colby, F. P. (1989) Ragweed pollen forecasting – A proposal. In *Aerobiology – Health – Environment – A symposium*. Ed. P. Comtois, Univ. Montreal, pp. 239
- Feher, Z. and Jarai-Komlodi, M. (1996) An examination of the main characteristics of the pollen seasons in Budapest, Hungary (1991-1996). *Grana* 36 : 169-174
- Fiorina, A., Mincarini, M., Sivori, M., Bricchetto, L., Scordamaglia, A. and Canonica, G. W. (1999) Aeropollinic sampling at three different heights by personal volumetric collector (Partrap FA 52). *Allergy* 54: 1309-1315
- Fireman, P. (03.98) The most common allergy : allergic rhinitis – nasal allergies – causes, effects, and relief – The Allergy Report 1998 – sponsored supplement – American Academy of Allergy, Asthma and Immunology. Discover
- Fischbach, F. A. (1986) Biophysical factors in ragweed pollen. Avoidance strategies in a community. *Grana* 25: 221-233
- Fishbach, F. A. (1976) Preliminary report on the total season ragweed pollen count in an urban area. Wisconsin Academy of Sciences, Arts

and Letters 64 : 121-131

Fishbach, F. A. and Wenger, R. B. (1975) An air quality management model for urban ragweed pollen. *Environmental letters* 10 (4) 335-351  
Flash herbe à poux (juin 2000) Bulletin d'information. Table québécoise sur l'herbe à poux 1 (1)

Fraile, R., Castro, A. and Calvo, A. I. (2004) The behaviour of the atmosphere in long-range transport. Abstract in: *Polen, International Palynological Congress in Grenada (Spain)*. Ed. Departamento de Biología Vegetal, Universidad de Córdoba

Fraile, R., Calvo, A. I., Castro, A., Fernández-Gonzalez, D. and García-Ortega, E. (2006) The behavior of the atmosphere in long-range transport. *Aerobiologia* 22 (1) 35-45

Frampton, V. L., Linn, M. B. and Hansing, E. D. (1942) The spread of virus diseases of the yellow type under field conditions. *Phytopathology* 32: 799-808.

Freguelli, G., Bricchi, E., Romano, B., Mincigrucci, G. and Spieksma, F. Th. M. (1989) A predictive study on the beginning of the pollen season for Gramineae and *Olea europea* L. *Aerobiologia* 5: 64-70

Frère Marie-Victorin (1964) *Flore Laurentienne*. Deuxième édition. Presses de l'Université de Montréal

Friedman, M. (1937) The use of ranks to avoid the assumption of normality implicit in the analysis of variance. *J. Amer. Stat. Ass.* 32: 675-701

Gagnon, L. (1989) La spora pollinique de l'île de Montréal et sa représentativité géographique. Mémoire de maîtrise, département de géographie, faculté des arts et des sciences, Université de Montréal, Montréal. pp. 99 et annexes

Galán Soldevilla, C., Alcázar-Teno, P., Domínguez-Vilches, E., Villamandos de la Torre, F. and García-Pantaleón, F. I. (1995) Airborne pollen grains concentrations at two different heights. *Aerobiologia* 11 : 105-109

Gal-Chen, T. and Somerville, R. C. (1975) On the use of a coordinate transformation for the solution of Navier-Stokes. *J. Comput. Phys.* 17: 209-228

Gagnon, L. (1989) La spora pollinique de l'île de Montréal et sa représentation graphique. Mémoire de maîtrise en Géographie présenté à la Faculté des Sciences de l'Université de Montréal

García-Mozo, H., Galán, C., Aira, M. J., Belmonte, J., Díaz de la Guardia, C., Fernández, D., Gutiérrez, A. M., Rodríguez, F. J., Trigo, M. M. and Domínguez-Vilches, E. (2002) Modelling start of oak pollen season in different climatic zones in Spain. *Agricultural and Forest Meteorology* 110 (4) 247-257

Garneau, M., Guay, F. and Breton, M.-C. (2002) Hausse des concentrations des particules organiques (pollen et spores) causée

par le changement climatique et ses conséquences sur les maladies respiratoires des populations vulnérables en milieu urbain. Proposition soumise au Fond d'Action pour le Changement Climatique. Sous-composante Impacts et Adaptation, Santé humaine, Proposition A571

Garner, W. W. and Allard, H. A. (1920) Effect of relative length of day and night and others factors of the environment on growth and reproduction in plants. *J. Agr. Res.* 18: 533-606

Gelbard, F. and Seinfeld, J. H. (1979) The general dynamics equation for aerosols. *J. Colloid. Interface Sci.* 68 (2) 363-382

Gebhard, D., Frenz, D. and Ziska, L. H. (2002) Meteorological conditions and atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentrations control *Ambrosia artemisiifolia*'s phenological atmospheric ambrosia pollen count. Allergy and Immunology meeting American Academy

Geller-Bernstein, C., Bergmann, E. and Waisel, Y. (2003) Threshold levels of airborne pollen in a Mediterranean city: Tel-Aviv. In: *TESA Third Symposium on Aerobiology book of abstracts*, National Pollen Research Unit, University College, Worcester, U.K.

Giner, M. M., García, J. S. C. and Selles, J. G. (1999) Aerobiology of *Artemisia* airborne pollen in Murcia (SE Spain) and its relationship with weather variables : annual and intra diurnal variations for three different species. Wind vectors as a tool in determining pollen origin. *Int. J. Biometeorol.* 43: 51-63

Giorgi, F. (1986) A particle dry-deposition parameterization scheme for use in tracer transport models. *Journal of Geophysical research*. Volume 91/8. Issue D9: 9794-9806

Giorgi, F. (1990) Simulation of a regional climate using a limited area nested in a general circulation model. *J. Clim.* 3 : 941-963

Giorgi, F. and Marinucci, M. R. (1991) Validation of a regional atmospheric model over Europe: sensitivity of wintertime and summertime simulations to selected physics parametrizations and lower boundary conditions. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 117 : 1171-1206

Gong, S. and Zhang, X. (2003) Modeling size-segregated soil dust aerosol during Ace-Asia, 2001: Implications for Trans-Pacific Transport. 2nd International Mineral Dust Workshop. Sept. 10-12, Paris, France

Gong, S. L., Barrie, L. A. and Lazare, M. (2002) Canadian Aerosol module (CAM) : A size segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models 2. Global sea-salt aerosol and its budgets, *J. Geophys. Res.* 107 (D24) 4779

Gong, S. L., Barrie, L. A., Blanchet, J.-P., von Salzen, K., Lohmann, U., Lesins, Spacek, L., Zang, E., Girard, E., Lin, H., Leaitch, R., Leighton, H., Chylek, P. G. and Huang, P. (2002) CAM : A size segregated simulation of atmospheric aerosol processes for climate and air quality models 1. Module development, *J. Geophys. Res.*

Gong, S. L., Barrie, L. A., Blanchet, J.-P., von Salzen, K., Lohmann, U., Lesins, G., Lavoué, D., Jiang, J., Lin, H., Girard, E., Leaitch, R.,

- Leighton, H., Chylek, P. and Spacek, L. (1999) CAM : Treatment of the size segregated atmospheric aerosols for climate and air quality models: 1. Module Development. *J. Geophys. Res.*
- Goulet L. (1996) Prévalence et gravité des symptômes d'allergie respiratoire chez les résidents de l'île de Montréal. Direction de la Santé Publique. Régie régionale de la santé et des services sociaux de Montréal-centre, Rapport d'enquête, pp. 52
- Goyette, S., Beniston, M., Caya, D., Laprise, R. and Jungo, P. (2001) Numerical investigation of an extreme storm with the Canadian Regional Climate Model: the case study of windstorm Vivian, Switzerland, February 27, 1990. *Climate dynamics* 18: 145-168
- Goyette-Pernot J., Muñoz-Alpizar, R., Blanchet J.-P., Goyette, S. and Beniston, M. (2004) High resolution simulation of a ragweed pollen cloud. Abstract in the XI International Palynological Congress, Granada, Spain. Departamento de Biología Vegetal Eds. pp. 81
- Goyette-Pernot J., Muñoz-Alpizar, R., Blanchet J.-P., Goyette, S. and Beniston, M. (2003a) First attempt of high resolution simulation of a ragweed pollen cloud over Montreal area. Extended abstract published in proceedings vol.2 of the Fifth International Conference on Urban Climate. Lodz, Poland. Klysik, K., Oke T., Fortuniak, K., Grimmond, S. and Wibig J. Eds.
- Goyette-Pernot J., Muñoz-Alpizar, R., Blanchet J.-P., Goyette, S. and Beniston, M. (2003b) Modelling the ragweed pollen cloud over a city center. Abstract in the Third European Symposium on Aerobiology (TESA). National Pollen Research Unit, University College, Worcester, UK. pp. 103
- Goyette-Pernot, J. and Comtois, P. (2002) Urban aerobiology: how does a north American city center perturb the dispersal of a regional pollen cloud? Case of Montreal, Canada. Abstract in the 7<sup>th</sup> International Congress on Aerobiology, Château Montebello, Canada. "Aerobiology: coming of age in a new millennium". pp. 54
- Gregory, Ph. (1978) Distribution of airborne pollen and spores and their long distance transport. *Pure Appl. Geophys.* 116: 309-315
- Gregory, Ph. (1973) *The microbiology of the atmosphere*. 2<sup>nd</sup> edition. A Halsted Press Book. John Wiley and sons. New York – Toronto. pp. 377
- Gregory, P. H. (1968) Interpreting plant disease dispersal gradients. *Annual Review of Phytopathology* 6: 189-212
- Gregory, P. H. (1945) The dispersion of airborne spores. *Trans. Br. Mycol. Soc.* 28: 26-72
- Harf, R., Contassot, J. C., Déchamp, C., Despres, B., Deviller, P., Diter, P., Garcier, Y., Liard, R., Neukirch, F., Quelin, P., Sarrazin, G. (1992) Prévalence biologique et clinique de la pollinose due aux ambrosies dans la vallée supérieure du couloir Rhodanien. *Allergie et immunologie* 24 (3) 95-97
- Harrington, J. B. (1965) Atmospheric diffusion of ragweed pollen in urban areas. Volume II in *Atmospheric pollution by aeroallergens: Meteorological phase*. Edited by Hewson, E. W. University of Michigan Press, Ann Arbor
- Harrington, J. B. and Metzger, K. (1963) Ragweed pollen density. *Am. J. Bot.* 50 : 532-539
- Hart, M. L., Wentworth, J. E. and Bailey, J. P. (1994) The effects of trap height and weather variables on recorded pollen concentration at Leicester. *Grana* 33: 100-103
- Hasnain, S. N. (1993) Influence of meteorological factors on the air spora. *Grana* 32: 184-188
- Heise, H. A. and Heise, E. R. (1957) Effect of a city on the fall-out of pollens and molds. *J.A.M.A.* 163 (10)
- Helbig, N., B. Vogel, H., Vogel and F. Fiedler (2004) Numerical modelling of pollen dispersion on the regional scale, *Aerobiologia* 20: 3-19
- Helmjroos, M. (1992) Long-distance transport of Betula pollen grains and allergic symptoms. *Aerobiologia* 8 (2) 231-236
- Helmjroos, M. (1991) Evidence of long transport of Betula pollen. *Grana* 30: 257-265
- Hermann-Kunz, E. (1999) Heuschupfenprävalenz in Deutschland – Ost – West – Vergleich und zeitlicher Trend. *Gesundheitswesen*. 61 Sonderheft 2 : S94-S99
- Hollander, M. and Wolfe, D. (1999) *Non parametric statistical methods*. New York : Wiley and Sons
- Holmes, R. M. and Bassett, I. J. (1963) Effect of meteorological events on ragweed pollen count. *Int. J. of Biometeorology* 7: 27-34
- Horst, T. W. (1977) A surface depletion model for deposition from a Gaussian plume. *Atmospheric Environment* 11: 41-46
- Hyde, H. A. (1952) Studies in atmospheric pollen. V. A daily census of pollens at Cardiff for the six year 1943-1948. *New Phytologist*. 51: 281
- Hydro-Québec (décembre 1993) Répertoire des arbres et arbustes utilisés à proximité des équipements d'hydro-Québec. Version préliminaire, Première édition. Vice-présidence environnement, Hydro-Québec. Montréal. pp. 960
- Igea, J. M. and Lazaro, M. (2003) The perfect storm: the best conditions for making pollinic patient's symptoms worse. *Allergy* 58: 680
- ISAAC - The International Study of Asthma and Allergies in Childhood (ISAAC) Steering Committee (1998) "Worldwide variation in prevalence of symptoms of asthma, allergic rhinoconjunctivitis, and atopic eczema: ISAAC." *Lancet* 351: 1225-32

- Jäger S. (2000) Ragweed (*Ambrosia*) sensitisation rates correlate with the amount of inhaled airborne pollen. A 14-year study in Vienna, Austria. *Aerobiologia* 16: 149-153
- Jäger, S. (1998) Global aspect of ragweed in Europe. In: Spieksma FT (ed) Satellite Symposium Proceedings: Ragweed in Europe. 6<sup>th</sup> International Congress on Aerobiology, Perugia, Italy. Alk-Abello, Horsholm 3-5
- Jäger, S. (1991) Allergenic significance of *Ambrosia* (Ragweed). In: D'Amato G., Spieksma, F. Th. M., Bonini, S. Allergenic pollen and pollinosis in Europe. Oxford: Blackwell Sc. Publ. 125-128
- Jäger, S. (1989) Trends in the frequency of different pollen types in Vienna from 1976 to 1989. *Aerobiologia* 5: 9-16
- Janssen, C. R. (1966) Recent pollen spectra from deciduous and coniferous-deciduous forest of northeastern Minnesota: a study in pollen dispersal. *Ecology* 47 (5) 804-807
- Jarai-Komlódi M. and Juhász, M. (1993) *Ambrosia elatior* in Hungary (1989-1990). *Aerobiologia* 9: 75-78
- Jarosz, N., Loubet, B. and Huber, L. (2004) Modelling airborne concentration and deposition rate of maize pollen. *Atmospheric Environment* 38 : 5555-5566
- Jarosz, N. (2003) Etude de la dispersion atmosphérique du pollen de maïs. Contribution à la maîtrise des risques de pollinisation croisée. Ph.D. Thesis, Institut National Agronomique de Paris-Grignon, France, 125 pp.
- Jelks, M. L. (1991) Interpretation of pollen counts. *Annals of Allergy*, 67
- Jones, A. M. and Harrison, R. M. (2004) The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations – a review. *Science of the Total Environment* 326 : 151-180
- Jones, M. D. (1952) Time of day of pollen shedding of some hay fever plants. *J. Allergy* 23: 247-58
- Jossart, J., Garneau, M., Milton, J., Bonvalot, Y., Vigeant, G. et A. Cotnoir (2002) Rapport interne, Département de Géographie, Université du Québec à Montréal, 55 pages
- Juhász, M., Makra, L. and Juhász, I. E. (2004) Role of meteorological factors on pollen production of *Ambrosia*. Abstract in: Polen, International Palynological Congress in Grenada (Spain). Ed. Departamento de Biología Vegetal, Universidad de Cordoba
- Juhász, M and Jarai-Komlodi, M. (1996) 7-year study of airborne ragweed pollen in Hungary. *Allergy* 51 (31) 190-191
- Kalkstein, L. S., Nichols, M. C., Barthel, C. D. and Greene, J. S. (1996) A new spatial classification: application to air-mass analysis. *International Journal of Climatology* 16 : 983-1004
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A. and Reynolds, B., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., and Wang, J., Jenne, R. and Joseph, D (1996) The NCEP/NCAR 40-years Reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77 : 437-471
- Käpälä, M. (1984) The variation of airborne pollen concentrations around a big building in a town. In: *Nordic Aerobiology*. Ed. Nilsson and Raj. Almqvist and Wiksell, Stockholm, 39-42
- Knox R. B. (1979) Pollen and allergy. The Institute of Biology's studies in Biology n°107, Edward Arnold
- Krahn, M. D., Berka, C., Langlois, P. and Detsky, A. S. (1996) Direct and indirect costs of asthma in Canada, 1990. *CMAJ*. 154 (6) 821-31
- Kramer, C. L. and Eversmeyer, M. G. (1987) Uniformity of airborne concentrations. In: *Advances in Aerobiology*, Birkhäuser verlag Basel. 313-317
- Laaidi K. (2001) Predicting days of high allergenic risk during *Betula* pollination using weather types. *Int. J. Biometeorol.* 45 (3) 124-32
- Laaidi, M. (2001) Forecasting the start of the pollen season of Poaceae: evaluation of some methods based on meteorological factors. *Int. J. Biometeorol.* 45: 1-7
- Laaidi K. and Laaidi, M. (1999) Airborne pollen of *Ambrosia* in Burgundy (France) 1996-1997. *Aerobiologia* 15: 65-69
- Laaidi, K., Laaidi, M et J.-P. Besancenot (1997) Pollens, pollinoses et météorologie. *La Météorologie* 8<sup>e</sup> série 20: 41-56
- Landsberg, H. E. (1981) The urban climate. New York: Academic Press
- Laprise, R, D. Caya, M. Giguère, G. Bergeron, H. Côté, J.-P. Blanchet, G. J. Boer, and N. A. McFarlane (1998) Climate of Western Canada under current and enhanced greenhouse gas concentration as simulated by the Canadian Regional Climate Model. *Atmos-Ocean* 36 (2) 119-167
- Laprise, R. D., Caya, D., Bergeron, G. and Giguère, M. (1997) The formulation of André Robert MC<sup>2</sup> (Mesoscale compressible community) model. *Atmos-Ocean* 35 (1) 195-220
- Law, A. W., Reed, S., D., Sundy, J., S., and Schulman, K., A. (2003) Direct costs of allergic rhinitis in the United States: Estimates from the 1996 Medical Expenditure Panel Survey. *J. Allergy Clin. Immunol.* 111 (2) 296-300
- Leduc, R. et Gervais, R. (1985) *Connaître la météorologie*. Presses de l'Université du Québec



- Leuschner, R. M., Christen, H., Jordan, P. and Vonthein, R. (2000) 30 years studies of grass pollen in Basel (Switzerland). *Aerobiologia* 16: 381-391
- Leuschner, R. M. (1978) Registrierte Luftpollen von *Ambrosia L.* als Hinweis auf ein Vorkommen dieser Adventivpflanzen. *Bauhinia* 6: 265-271
- Leuschner, R. M., Boehm, G. and Mari, R. (1990) L'ambrosie progresse t'elle? *Bull. Soc. Bot. Franc.* 137: 144-145
- Lewis, S. A., Corden, J. M., Forster, G. E. & Newlands, M. (2000) Combined effects of aerobiological pollutants, chemical pollutants and meteorological conditions on asthma admissions and A & E attendances in Derbyshire UK, 1993—96. *Clinical & Experimental Allergy* 30 (12) 1724-1732
- Lewis, W. H., Vinay, P., Zenger, V. E. (1983) Airborne and allergenic pollen of North America. The Johns Hopkins; University Press, Baltimore and London, pp. 254
- Liccardi G., Custovic, A., Gazzola, M., Russo, M., D'Amato, M. and D'Amato, G. (2001) Avoidance of allergens and air pollutants in respiratory allergy. *Allergy* 56: 705-722
- Linneberg A., Jorgensen T, Nielsen NH, Madsen F, Frolund L, Dirksen A. (2000) "The prevalence of skin-test-positive allergic rhinitis in Danish adults: two cross-sectional surveys 8 years apart. The Copenhagen Allergy Study." *Allergy* 55:767-772
- Ljungkvist, S., Bringfelt, B. and Fredriksson, U. (1977) Correlation between the pollen content of the Stockholm air and meteorological data. *Grana* 16 : 145-146
- Løfstrøm, C., Geels, C., Brandt, J., Frohn, L. M., Kjellson, G., Damgaard, C. and Simonsen, V. (2003) Modelling long-distance wind dispersal of GM pollen from oilseed rape. Abstract in: GMCC-03 1st European Conference on the Co-existence of Genetically Modified Crops with Conventional and Organic Crops
- Majd, A., Chehregani, A., Moin, M., Gholami, M., Kohno, S., Nabe, T. and Shariatzade, M. A. (2004) The effects of air pollution on structures, proteins and allergenicity of pollen grains. *Aerobiologia* 20 : 111-118
- Makra, L., Juhász, M., Borsos, E and Béczi, R. (2004) Meteorological variables connected with airborne ragweed pollen in Southern Hungary. *International Journal of Biometeorology* 49 : 37-47
- Makra, L., Juhász, M., Mika, J., Bartzokas, A., Béczi, R. and Sümeghy, Z. (2006) An objective classification system of air mass types for Szegred, Hungary, with special attention to plant pollen levels. *International Journal of Biometeorology*
- Malik, P., Singh, A. B., Babu, C. R. and Gangal, S. V. (1991) Atmospheric concentration of pollen grains at human height. *Grana* 30 : 129-135
- Mann, H. R. and Whitney, D. R. (1947) On a test of whether one or two random variables is stochastically larger than the other. *Ann. Math. Statist.* 18: 52-54
- Mandeville J. (1995) Caractérisation de la dynamique d'*Ambrosia artemisiifolia L.* à sa limite nord-est actuelle de distribution dans la région du Bas-Saint-Laurent/Gaspésie. Mémoire de maîtrise de la Faculté des Etudes Supérieures – Dept de géographie – Univ. De Montréal
- Mandrioli, P., Di Cecco, M. and Andina, G. (1998) Ragweed pollen: the aeroallergen is spreading in Italy. *Aerobiologia*, 14: 13-20
- Mandrioli, P., Negrini, M. G. and Zanotti, A. L. (1982) Airborne pollen from Yugoslavian coast to the Po Valley (Italy). *Grana* 21: 121-128
- Mandrioli, P., Negrini, M. G., Scarani, C., Tampieri, F. and Trombetti, F. (1980) Mesoscale transport of *Corylus* pollen grains in winter atmosphere. *Grana* 19: 227-233
- Mandrioli, P., Scarani, C., Tampieri, F. and Trombetti, F. (1978) Airborne pollen source modelling. In : Proceedings of 1st International Conference on Aerobiology, Munich, Germany. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 393-406
- Marchand, Y. (1997) Pollution atmosphérique et impact sur la santé et l'environnement. Rapport synthèse de la DSP - Régie Régionale de la Santé et des Services Sociaux de Montréal-Centre
- Marshall, P. S., O'Hara, C. and Steinberg, P. (2002) Effects of seasonal allergic rhinitis on fatigue levels and mood. *Psychosom Med.* 64 (4) 684-91
- Marx, H. (1956) On forecasting ragweed pollen counts, M. S. thesis, Pennsylvania State University
- Mc Donald, M. S. (1980) Correlation of airborne grass pollen levels with meteorological data. *Grana* 19: 53
- McFarlane, N. A., Boer, G. J., Blanchet J. P. and Lazare, M. (1992) The Canadian Climate Centre second generation General Circulation Model and its equilibrium climate. *J. Climate* 5: 1013-1044
- Mc Menamin, P. (1994) Costs of hay fever in the United States en 1990. *Ann. Allergy.* 73 (1) 35-9
- Mitic, B., Kofol-Seliger, A. & Peternel, R. (2004) Continental Slovenia and Croatia as a common information area for pollen forecasting. Abstract in: Polen, International Palynological Congress in Grenada (Spain). Ed. Departamento de Biología Vegetal, Universidad de Cordoba
- Moore, B. L. and Jackson, P. L. (2004) Effects of topography upon mountain pine beetle (*Dendroctonus ponderosae*) transport and dispersion as indicated by mesoscale meteorological models. Abstract in 16<sup>th</sup> AMS Biometeorology and Aerobiology Conference in Vancouver, Canada
- Moselholm, L., Weeke, E. R. and Petersen, B. N. (1987) Forecast of pollen concentrations of poaceae (grasses) in the air by time series

- analysis. *Pollen and Spores*. Vol XXIX, n° 2-3: 305-322
- Moy, L. A., Dickerson, R. R. and Ryan, W. F. (1994) Relationship between back trajectories and tropospheric trace gas concentrations in rural Virginia. *Atmospheric Environment* 28 (17) 2789-2800
- Munn, R. E. (1966) *Descriptive meteorology: Advances in Geophysics Supplement 1*. Academic Press, pp. 245
- Muñoz-Alpizar, R. and Blanchet J. P. (2002) Numerical simulation of pollen clouds in the region of Montreal using NARCM. CMOS. Rimouski, Canada
- Munuera Giner, M., Carrión García, J. S. and García Sellés, J. (1999) Aerobiology of *Artemisia* airborne pollen in Murcia (SE Spain) and its relationship with weather variables: annual and intradiurnal variations for three different species. Wind vectors as a tool in determining pollen origin. *Int. J. Biometeorol.* 43: 51-63
- Muranaka, M., Suzuki, S., Koisumi, K., Takafuji, S., Miyamoto, T., Ikemori, R. and Tokiwa, H. (1986) Adjuvant activity of diesel exhaust particulates for the production of IgE antibody in mice". *He Journal of Allergy and Clinical Immunology* 79 : 639-645
- Nicholson, K. W. (1988a) A review of particle resuspension. *Atmos. Environ.* 22: 2639-2651
- Nicholson, K. W. (1988b) The dry deposition of small particles: a review of experimental measurements. *Atmos. Environ.* 22 : 2653-2666
- Norris-Hill, J. (1995) The modelling of daily poaceae pollen concentrations, *Grana* 34: 182-188
- Norris-Hill, J. and Emberlin, J. (1993) The incidence of increased pollen concentrations during rainfall in the air of London. *Aerobiologia* 9: 27-32
- Norris-Hill, J. and Emberlin, J. (1991) Diurnal variation of pollen concentration in the air of London. *Grana* 30: 229
- Ogden E.C., Hayes, J. V. and Rayner, G. S. (1969) Diurnal patterns of pollen emission in *Ambrosia*, *Phleum*, *Zea*, *Ricinus*. *Am. J. Bot.* 56: 16-21
- Okamoto, Y., Sakurai, D. and Horiguchi, S. (2004) Allergic rhinitis in children: environmental factors. *Clin. Exp. All Rev.* 4 : 9-14
- Oke, T. R. (1987) *Boundary layer climates*. Second edition. Methuen: London and New York
- Oke, T. R. and Fuggle, R. F. (1972) Comparison of urban/rural counter and net radiation at night. *Boundary-Layer Meteorology* 2 : 290-308
- Okuda, M. (1998) Cost implication of allergic rhinitis. *Allergy Immunol.* 5 : 86-91
- Okubo, A. and Levin, S. A. (1989) A theoretical framework for data analysis of wind dispersal of seeds and pollen. *Ecology* 70 (2) 329-338
- Ong, E. K., Singh, M. B. and Knox, R. B. (1995) Seasonal distribution of pollen in the atmosphere of Melbourne: an airborne pollen calendar. *Aerobiologia* 11 : 51-55
- O'Rourke, M. K. and Lebowitz, M. (1984) A comparison of regional atmospheric pollen with pollen collected at and near homes. *Grana* 23: 55-64
- Pasken, R. and Pietrowicz, J. (2002) Using mesoscale meteorological models as a tool to forecast pollen concentrations. MM5 users conference. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Co
- Pasken, R. and Pietrowicz, J. (2002) Graphical display of pollen concentration forecasts. 15<sup>th</sup> Conference on Biometeorology and Aerobiology. American Meteorological Society Kansas City, Mo
- Pasquill, F. (1962) *Atmospheric diffusion*. First edition. Van Nostrand. London. England.
- Pedgley, D. A. (1980) *Weather and airborne organisms*. WMO Tech. Note n° 173. WMO 562
- Peeters, A. G. (2000) *Ambrosia* sp. Pollen in Switzerland. *Aerobiologia* 16: 295-297
- Peeters, A. G. (1998) Cumulative temperatures for prediction of the beginning of ash (*Fraxinus excelsior* L.) pollen season. *Aerobiologia* 14: 375-381
- Peeters, A. G. and Zoller, H. (1988) Long range transport of *Castanea sativa* pollen. *Grana* 27: 203-207
- Persson, C., Rodhe, H. and de Geer, L. E. (1987) The Chernobyl accident – A meteorological analysis of how radionuclides reached and were deposited in Sweden. *Ambio.* 16: 20-31
- Pielke, R. A., Cotton, W.R., Walko, R. L., Tremback, C. J., Lyons, W. A., Grasso, L. D., Nicholls, M. E., Moran, M. D., Wesley, D. A., Lee, T. J. and Copeland, J. H. (1992) A comprehensive meteorological modelling system – RAMS. *Meteor. Amos Phys.* 49 : 69-91 (RAMS website: <http://atmet.com/> site consulté le 27.09.2005)
- Pietrowicz, J. and Pasken, R. (2002) Testing of mesoscale meteorological models as a tool to forecast pollen concentrations. MM5 users conference. National Center for Atmospheric Research, Boulder, Co.
- Porsbjerg, C., Rasmussen, A. and Backer, V. (2003) Airborne pollen in Nuuk, Greenland, and the importance of meteorological parameters. *Aerobiologia* 19: 29-37
- Powell, A. (1993) *Aerobiology*. CAGM Report n° 54. WMO / TD - n° 542
- Quednau, K., Schramm, B., Ehlken, B., Smala, A., Naujoks, C. and

- Berger, K. (2001) Cost-of-illness study: allergic asthma and seasonal allergic rhinitis in Germany. ISPOR Fourth Annual European Congress, Cannes, France
- Quénel P. et al. (1996) Associations entre les concentrations aériennes de pollens et les pollinoses saisonnières : synthèse des études épidémiologiques publiées entre 1978 et 1995. *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, 45: 224-236
- Rantio-Lehtimäki, A. and Ranta, H. M. (2004) Long distance transport of allergenic pollen – a common phenomenon? Abstract in: *Polen, International Palynological Congress in Grenada (Spain)*. Ed. Departamento de Biología Vegetal, Universidad de Córdoba
- Rantio-Lehtimäki, A. (1994) Short, medium and long range transported airborne particles in viability and antigenicity analyses. *Aerobiologia* 10: 175-181
- Rantio-Lehtimäki, A., Koivikko, A., Kupias, R. Mäkinen, Y. and Phjola, A. (1991a) Significance of sampling height of airborne particles for aerobiological information. *Allergy* 46: 68-76.
- Ranzi, A., Lauriola, P., Marletto, V. and Zinoni, F. (2003) Forecasting airborne pollen concentrations: development of local models. *Aerobiologia* 19: 39-45
- Raynor, G. S., Ogden, E. C. and Hayes, J. V. (1973) Variation in ragweed pollen concentration to a height of 108 meters. *J. Allergy Clin. Immunol.* 51 (4) 199-207
- Raynor G. S., Hayes, J. V. and Ogden, E. C. (1972) Dispersion and deposition of corn pollen from experimental sources. *Agron. J.* 64 : 420-427
- Raynor G. S., Hayes, J. V. (1970) Experimental prediction of daily ragweed concentration. *Annals of Allergy*, 28: 580-585
- Raynor G. S., Ogden, E. C. and Hayes, J. V. (1970) Dispersion and deposition of ragweed pollen from experimental sources. *Journal of Applied Meteorology* 9 : 885-895
- Raynor G. S., Ogden, E. C. and Hayes, J. V. (1968) Effect of a local source on ragweed pollen concentrations from background sources. *J Allergy Clin. Immunol.* 4 (41) 217-225
- Raynor G. S., Ogden, E. C. (1965) Twenty-four-hour dispersion of ragweed from known sources. Report of Associated Universities Inc. Brookhaven National Laboratories
- Ribeiro, H., Cunha, M. and Abreu, I. (2003) Airborne pollen concentration in the region of Braga, Portugal and its relationship with meteorological parameters. *Aerobiologia* 19: 21-27
- Rich, T. C. G. (1994) Ragweeds (*Ambrosia* L.) in Britain. *Grana* 33: 38-43
- Riedl, M. and Diaz-Sanchez, D. (2005) Biology of diesel exhaust effects on respiratory function. *Molecular mechanisms in allergy and clinical immunology*. American Academy of Allergy, Asthma and Immunology. pp. 221-228
- Robertson, G. and Lebowitz, M. D. (1984) Analysis of relationship between symptoms and environmental factors over time. *Environmental Research* 33 : 130-143
- Robertson, L. (2004) Extended back-trajectories by means of adjoint equations. 0647-2116 SMHI Reports Meteorology Climatology 105
- Rogers, C. A., Wayne, P. M., Macklin, E. A., Muilenberg, M. L., Wagner, C. J., Epstein, P. R. and Bazzaz, F. A. (2006). Interaction of the onset of spring and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L) pollen production. *Environmental Health Perspectives* 114 (6)
- Rogers, C. and Levetin, E. (1998) Evidence of long-distance of mountain cedar pollen into Tulsa, Oklahoma. *Int J Biometeorol.* 42: 65-72
- Rousseau, D. D., Schevin, P., Duzer, D., Cambon, G., Ferrier, J., Jolly, D. and Poulsen, U. (2005) Pollen transport to southern Greenland : new evidences of a late spring long distance transport. *Biogeosciences Discussions* 2: 829-847
- Rousseau, D. D., Duzer, D., Etienne, J. L., Cambon, G., Jolly, D., Ferrier, J. and Schevin, P. (2004) Pollen record of rapidly changing air trajectories to the North Pole. *J. Geophys. Res.* 109
- Rousseau, D.D., Duzer, D., Cambon, G., Jolly, D., Poulsen, U., Ferrier, J. Schevin, P. and Gros, R. (2003) Long distance transport of pollen to Greenland, *Geophys. Res. Lett.* 30: 1766
- Rybncck, O. and Jäger, S. (2001) *Ambrosia* (ragweed) in Europe. *Allergy and Clinical Immunology*. 13 (2) 60-66
- Saar M., Gudzinckas, Z., Ploompuu, T., Linno, E., Minkiene, Z. and Motiekaityte V. (2000) Ragweed plants and airborne pollen in Baltic states. *Aerobiologia* 16 : 101-106
- Sánchez Mesa, J. A., Galán, C. and Hervás, C. (2005) The use of discriminant analysis and neural networks to forecast the severity of the Poaceae pollen season in a region with a typical Mediterranean climate. *Int J Biometeorol* 49 : 355-362
- Sánchez Mesa, J. A., Galán, C., Martínez-Heras, J. A. and Hervás-Martínez, C. (2002) The use of neural networks to forecast daily grass pollen concentration in a Mediterranean region: the southern part of the Iberian Peninsula. *Clin Exp Allergy* 32 : 1606-1612
- Sheldon, J. M. and Hewson, E. W. (1959) Atmospheric pollution by bioallergens. *Univ. Mich. Res. Inst. Prog. Rep.* 3. University of Michigan, Ann Arbor, 103 p. In: Edmonds, R. L. (1979) *Aerobiology – The ecological systems approach*. US/IBP synthesis series 10. Dowden, Hutchinson & Ross, Inc.
- Sheridan, S. (2002) The redevelopment of a new weather-type

- classification scheme for North America. *Int. J. Climatol.* 22: 51-68
- Sherrer, B. (1984) *Biostatistique*. Gaëtan Morin éditeur. pp. 850
- Siegel, S. (1956, 1965) *Non parametric statistics for the behavioral sciences*. Mc Graw-Hill, bookcompany. pp. 312
- Singer, B., Ziska, L. H., Frenz, D. and Stralka, J. (2002) Extraction of protein from the pollen of common ragweed, *ambrosia artemisiifolia*: use of the method for the immunochemical quantification of antigen A1/A2 in pollen of plants grown in controlled CO<sub>2</sub> environments. *Allergy and Immunology Meeting American Academy*
- Skoner, D. P. (2001) Allergic rhinitis: definition, epidemiology, pathophysiology, detection and diagnosis. *J Allergy Clin Immunol.* 108: S2-S8
- Solomon, W. R. (2003) How ill the wind? Issues in aeroallergen sampling. *J. Allergy Clin. Immunol.* 112 (1) 3-8
- Solomon, W.R. and Platts- Mills, T.A.E. (1998) Aerobiology outdoor allergens. In *Allergy Principles and Practice*, 5th ed., (E. Middleton, ed.), pp 367-403, St Louis, Mo.: Mosby-Year Book
- Solomon, W. R. (1984) Aerobiology and pollinosis. *J. Allergy Clin. Immunol.* 74 (4) 449-461
- Solomon, W. R., Burge, H. A., Boise, J. R. and Becker, M. (1980) Comparative particle recoveries by the retracting Rotorod, Rotoslide and Burkard spore trap sampling in a compact array. *Int. J. Biometeor.* 24: 9-16
- Solomon, W.R. (1976) A volumetric study of winter fungus prevalence in the air of Midwestern homes. *J Allergy Clin. Immunol.* 57 (1) 46-55
- Solomon, W.R. (1975) Assessing fungus prevalence in domestic interiors. *J. Allergy Clin. Immunol.* 56: 325.
- Smart, B. A. (2004) The costs of asthma and allergy. *Allergy & Asthma Advocate*: Fall 2004. Quaterly patient newsletter of the American Academy Allergy, Asthma and Immunology
- Smart, I. J., Tuddenham, W. G. and Knox, R. B. (1979) Aerobiology of grass pollen in the city atmosphere of Melbourne: effects of weather parameters and pollen sources. *Aust. J. Bot.* 27: 33-42
- Smith, M., Emberlin, J. and Kress, A. (2005) Examining high magnitude grass pollen episodes at Worcester, United Kingdom, using back-trajectory analysis. *Aerobiologia* 21 : 85-94
- Spacek, L., Gong, S., von Salzen, K., Lohman, U., Liu, P., Vet, R., Ro., C., Blanchet, J.-P., Barrie, L. A., Leighton, H. G., Hoff, R. M. and Girard, E. (1999) The NARCM Aerosol Model Applied to Eastern North America. Unpublished
- Spieksma, F. T. M., Emberlin, J. C., Hjelmroos, M., Jäger, S. and Leushner, R. M. (1995) Atmospheric birch (*betula*) pollen in Europe: Trends and fluctuations in annual quantities and the starting dates of seasons. *Grana* 34 : 51-57
- Summers, P. (1964) "An Urban Ventilation Model Applied to Montreal." PhD thesis, McGill University, Montreal
- Sunder, S et al. (1990) Premiers cas d'asthme dû au pollen de l'Ambrosie en Maine-et-Loire et Vendée. *Allergie et Immunologie* 22 (3) 108-111
- Stepalska, D., Szczepanek, K. and Myszkowska, D. (2002) Variation in *Ambrosia* pollen concentration in Southern and Central Poland in 1982-1999
- Stohl, A., Eckhardt, S., Forster, C., James, P., Spichtinger, N. and Seibert, P. (2002) A replacement for simple back trajectory calculations in the interpretation of atmospheric trace substance measurements. *Atmos. Env.* 36: 4635-4648
- Stull, R. B. (1989) *An introduction to boundary layer meteorology*. Second reprint. Kluwer academic publishers: Dordrecht, Boston and London
- Swissinfo (27.08.2003) L'ambrosie essaime en Suisse romande. Interview de Maurice Thomet, chef de culture au Conservatoire et jardin botanique de Genève.
- Szucs, T. D., Anderhub, H. and Rutishauser, M. (1999) The economic burden of asthma: direct and indirect costs in Switzerland. *Eur Respir.* 13 : 281-286
- Tampieri, F., Mandrioli, P. and Puppi, G. L. (1977) Medium range transport of airborne pollen. *Agricultural Meteorology*, 18: 9-20
- Tanguay, M., Robert, A. and L'Aprise, R. (1990) A semi-implicit semi-lagrangian fully compressible regional forecast model. *Mon. Wea. Rev.* 118: 1970-1980
- Thibaudon, M. (2002) Threshold of allergenic risk for the pollinic information in France. In: *Aerobiology: Coming the age of a New Millenium*. The 7<sup>th</sup> international Congress on Aerobiology, Château Montebello, Canada
- Thibaudon, M. (1992) *Ambrosia en France: quelques données aéropolliniques pour les années 1987 à 1990*. *Allergie et Immunologie* 24 (1) 9-16
- Thommen, A. A. (1931) Which plants cause hay fever? In: *Coca A. F., Walzer, M., Thommen, A. A. Eds. Asthma and hay fever in theory and practice*. Springfield, IL: Charles C. Thomas Publisher. pp. 546-554
- Thommen, A. A. (1930) The etiology of hay fever: studies in hay fever. *NY State J. Med.* 30: 437-442
- Tirabassi, T., Mandrioli, P. and Manco, D. (1991) Statistical distribution of airborne pollen grains. *Grana* 30: 00-05
- Triplett, J. P et Roche, G. (1986) *Météorologie générale*. Ecole nationale de la météorologie. Troisième édition

- United Nations Centre for human settlements (June 2001) 7 (2)
- Valencia- Barrera, R. M., Comtois, P. and Fernández-González D. (2002) Bioclimatic indices as a tool in pollen forecasting. *Int J Biometeorol* 46 : 171-175
- Venables, K. M., Allitt, U., Collier, C. G., Emberlin, J., Greig, J. B., Hardaker, P.J., Highham, J. H., Laing-Morton, T., Maynard, R. L., Murray, V., Strachan, D. and Tee, R. D. (1997) Thunderstorm-related asthma – the epidemic of 24/25 June 1994. *Clinical and Experimental Allergy* 27: 725-736
- Verseghy, D. L. (1991) CLASS – A Canadian Land Surface Scheme for GCMs, I. Soil Model. *Int. J. of Climatology* 11: 111-133
- Verseghy, D. L., McFarlane, N. A. and Lazare, M. (1993) CLASS - A Canadian Land Surface Scheme for GCMs, II. Vegetation model and coupled runs. *Int. J. of Climatology* 13: 347-370
- Vincent G. (1990) La petite herbe à poux. La conquête du territoire. *Quatre temps, SAJIB* 14 (3) 3-9
- Waisel, Y., Mienis, Z., Kosman, E. and Geller-Bernstein, C. (2004) The partial contribution of specific airborne pollen to induced allergy. *Aerobiologia* 20: 197-208
- Walko, R. L., Tremback, C. J. and Bell, M. J. (2001) HYPACT Hybrid particle and Concentration Transport Model, User's guide. Mission research Corp., Ft. Collins, CO
- Wardman, A. E. D., Stefani, D. and Mac Donald, J.C. (2002) Thunderstorm-associated asthma or shortness of breath epidemic: A Canadian case report. *Canadian Respiratory Journal*, 9 (3)
- Wayne, P., Forster, S., Connelly, J., Bazzaz, FA. and Epstein, P.R. (2002) Production of allergenic pollen by ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) is increased in CO<sub>2</sub> enriched atmospheres. *Ann Allergy Asthma Immunology* 88 (3) 279-282
- Webb, E. K. (1965) Aerial microclimate in agricultural meteorology. *Meteorological monograph*. Vol. 6, n° 28, published by the American Meteorological Society
- Weiss, K. B. and Sullivan, S. D. (2001) The health economics of asthma and rhinitis. I. Assessing the economic impact. *J of allergy and clinical immunology* 107 (1) 3-7
- Windom, H. H. and Togias, A. (2001) Rhinitis and asthma – Manifestations of one disease. *Allergy and clinical immunology international. Journal of WMO* 13 (4) 154-161
- Wodehouse, R. P. (1939) Weeds, waste and hayfever. *Nat. Hist.* 63 : 150-163, 178
- Yankova, R., Zlatev, V., Baltadjieva, D., Mustakov, T. and Mustakov, B. (2000) *Aerobiologia* 16: 299-301
- Zhang, G. P. (2003) Time series forecasting using a hybrid ARIMA and neural network model. *Neurocomputing*. 50: 159-175
- Ziska, L. H. and George, K. (2004) Rising Carbon Dioxide and Invasive, Noxious Plants: Potential Threats and Consequences. *World Resource Review*. 16: 427-447
- Ziska, L. H. (2003) Climate change, plant biology and public health. *World Resource Review*. 15 (3): 271-288
- Ziska, L. H., Gebhard, D. E., Frenz, D. A., Faulkner, S. Singer, B. D. and Straka, J. G. (2003) Cities as harbingers of climate change: common ragweed, urbanization, and publi health. *J. Allergy Clin Immunol.* 28 : 1384-1388
- Ziska, L. H. (2002) Ragweed pollen production in response to urban-induced CO<sub>2</sub> and temperature gradients. *Ecological Society of America Proceedings*
- Ziska, L. H. (2002) Sensitivity of ragweed (*Ambrosia Artemisiifolia* L.) growth to ground-level ozone. *Functional plant biology.* 29 (11) 1365-1369
- Ziska, L. H. (2001) Ragweed, rising CO<sub>2</sub> and public health. *Global Climate Change Conference Proceedings*
- Ziska, L. H. (2001) Climate change, CO<sub>2</sub> and ragweed. *Allergy and Immunology Meeting American Academy*
- Ziska, L. H. and Caulfield, F. A. (2000) Rising CO<sub>2</sub> and pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*), a known allergy-inducing species: implications for public health. *Australian J Plant Physiol.* 27: 893-898
- Ziska, L. H. and Caulfield, F. A. (2000) The potential influence of rising atmospheric carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) on public health: pollen production of common ragweed as test case. *World Resource Review.* 12: 449-457



## 2.1. Sites internet divers

Aerobiology Research Laboratories: <http://www.pollenplus.com/>

Akhtar F., Whitesides, B. and Yan, B. (2003) Back trajectory techniques in air pollution. EAS 6792. ppt presentation

CDC (2004) Fast Stats A-Z, Advanced Data from Vital and Health Statistics, no. 346, Table 13. <http://www.cdc.gov/nchs/fastats/allergies.htm> (site consulté le 15.02.2005)

Direction de l'Environnement de la Ville de Montréal : <http://www.rsqa.qc.ca/framville.asp?url=framrsqf.asp>

Division de la réponse aux urgences environnementales d'Environnement Canada : (site consulté le 24.09.2005) [http://www.msc-smc.ec.gc.ca/cmceer/model/trajectory/index\\_f.html](http://www.msc-smc.ec.gc.ca/cmceer/model/trajectory/index_f.html)

Dossier d'information, guide méthodologique en région Rhône-Alpes traitant de la lutte contre l'ambrosie (2000) (<http://www.rhone-alpes.sante.gouv.fr>)

Drouin, L. et Troalen, J. (14.07.1998) La CUM et la DSP lancent un appel pressant : il faut arracher ou couper l'herbe à poux trois semaines plus tôt cette année ! <http://www.cum.qc.ca/cum%2Dfr/annonces/com0714f.htm> (site consulté le 14.05.2001)

Drouin, L. et Troalen, J. (02.06.1998) La CUM et la DSP font appel aux citoyens : il faut arrêter la prolifération de l'herbe à poux ! <http://www.cum.qc.ca/cum%2Dfr/annonces/com0206f.htm> (site consulté le 14.05.2001) ce site n'existant plus, il est redirigé depuis le 01/01/2002 vers <http://www2.ville.montreal.qc.ca/>

Environnement Canada site internet : [www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/archive\\_f.cfm](http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/archive_f.cfm) (site consulté le 20.06.2005)

Environmental Software and Services : <http://www.ess.co.at/DEMOS/> (site consulté le 08.12.2005)

Gehrman, E. (17.07.2003) Climate, asthma connected, according to research: high pollen increases asthma suffering. Harvard Gazette. <http://www.news.harvard.edu/gazette/2003/07.17/17-allergens.html> (site consulté le 18.02.2005)

Grandes régions climatiques du Canada : [http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/annual04/figclimate\\_f.html](http://www.msc-smc.ec.gc.ca/ccrm/bulletin/annual04/figclimate_f.html)

Groupe NTT : <http://kankyo.lelab.ecl.ntt.co.jp/eng/research/environment/information.html#pollen> (site consulté le 08.12.2005)

Herbnatur : <http://www.herbnatur.ca/> (site consulté le 12.01.2005)

Institut Canadien d'information sur la santé : <http://secure.cihi.ca/>

[cihiweb/dispPage.jsp?cw\\_page=media\\_26oct2001\\_f](http://cihiweb/dispPage.jsp?cw_page=media_26oct2001_f)

Jeanblanc, A. (07.06.02) Alerte aux allergies. Tiré du site internet <http://www.lepoint.fr> (site consulté le 15.02.2005)

Modèle KAMM: <http://www.risoe.dk/ita/regneserver/projects/kamm.htm> (site consulté le 27.09.2005)

Modèle OML : (site consulté le 27.09.2005) [http://www2.dmu.dk/1\\_Viden/2\\_Miljoetilstand/3\\_luft/4\\_spredningsmodeller/5\\_OML/default\\_en.asp](http://www2.dmu.dk/1_Viden/2_Miljoetilstand/3_luft/4_spredningsmodeller/5_OML/default_en.asp)

Modèle RAMS: <http://www.atmet.com/> (site consulté le 27.09.2005)

Modèle HYPACT: [http://atmet.com/html/docs/hypact/1.2.0/hyp\\_ug-1.2.0.htm](http://atmet.com/html/docs/hypact/1.2.0/hyp_ug-1.2.0.htm) (site consulté le 27.09.2005)

Mont Royal : [http://www.unites.uqam.ca/~sct/mont-Royal/excursion\\_mt-royal.html](http://www.unites.uqam.ca/~sct/mont-Royal/excursion_mt-royal.html) (site consulté le 22.02.2005)

Modèle SMOP-2D : [http://pastel.paristech.org/archive/00000781/01/These\\_NJ.pdf](http://pastel.paristech.org/archive/00000781/01/These_NJ.pdf) (consulté le 27.09.2005)

NIAID - National Institute of Allergy and Infectious Diseases (2004) : [www.niaid.nih.gov](http://www.niaid.nih.gov) (site consulté le 15.02.2005)

NIAID - National Institute of Allergy and Infectious Diseases (2003) Airborne allergens. Something in the air. NIAID Health Info. NIH Publication N°03-7045. [www.niaid.nih.gov](http://www.niaid.nih.gov)

NOAA HYSPLIT Model: <http://www.arl.noaa.gov/ready/hysplit4.html> (site consulté le 24.09.2005)

Ozanam, M. (07.11.2003) Allergie : la rhinite n'est pas une maladie bénigne. Tiré du site internet : <http://www.zoomsante.comm> (site consulté le 14.02.2005)

Ozanam, M. (2003) Allergie, attention danger ! <http://www.doctissimo.fr> (site consulté le 16.02.2005)

Représentation d'ambrosie : <http://caliban.mpiz-koeln.mpg.de/~stueber/lindman/533.jpg>

Santé Canada : <http://www.hc-sc.gc.ca/>

Sommaire de la saison des cyclones tropicaux 2000 : [http://www.ns.ec.gc.ca/weather/hurricane/storm00\\_f.html](http://www.ns.ec.gc.ca/weather/hurricane/storm00_f.html) (site consulté le 02.07.2005)

Statistiques Canada : <http://www.statcan.ca/>

Trappe volumétrique 7 jours de chez Burkard : [http://www.burkardscientific.co.uk/Agronomics/Agronomics\\_Product\\_Spore\\_sampler.htm](http://www.burkardscientific.co.uk/Agronomics/Agronomics_Product_Spore_sampler.htm) (site consulté le 29.09.2005)

Université de Tulsa, Oklahoma : <http://pollen.utulsa.edu/mcforecast.html> (site consulté le 24.09.2005)

Ville Lasalle : <http://lasalle.ville.montreal.qc.ca/a10-fr/intra10f.asp>



## CURRICULUM VITÆ

---

Joëlle Goyette-Pernot

Née le 22 décembre 1967 à Reims, France

Mariée et mère de deux enfants

Nationalité française

### Formation académique

Juillet 2006: Acceptation par la Faculté des Sciences de l'Université de Fribourg de la thèse de doctorat intitulée : « L'Ambrosie : Analyse Statistique et Modélisation Numérique de sa Trajectoire Aérobiologique », en vue de l'obtention du grade de *Doctor rerum naturalium* sur la base des rapports d'experts du directeur de la thèse, le Professeur M. Beniston (Université de Fribourg, Suisse), du Professeur J.-P. Blanchet (UQAM, Canada) et du Professeur A. Guisan (Université de Lausanne, Suisse)

Août 2002: Advanced Aerobiology Analysis Course and Spore Camp, Université de Montréal, Canada. Diplôme délivré par the International Association for Aerobiology and the Pan American Aerobiology Association

Juillet 2000 – Juillet 2006 : Reprise du Ph.D. à l'Unité de Géographie du Département des Géosciences de l'Université de Fribourg et redirection prise en charge par le Professeur M. Beniston à compter de 2003. Collaboration avec le Professeur J.-P. Blanchet, directeur du programme de Doctorat de l'Unité des Sciences de l'Environnement à l'Université du Québec à Montréal (UQAM) et de son équipe. *Modification du sujet original de la thèse* : Modélisation numérique d'un nuage de pollen d'ambrosie à l'aide du modèle régional de climat canadien (MRCC) au-dessus de la grande région métropolitaine de Montréal, Canada et validation par l'observation et l'analyse statistique, du comportement du pollen durant 10 saisons polliniques de 1994 à 2003

Janvier 1995 – Juillet 2000 : Sabbatique le temps de 2 maternités

Avril 1994 : International Advanced Aerobiology Course donné par l'Université de Montréal, Canada, l'Université de Cordou, Espagne et le FISBAT Institute de Bologne, Italie

Mai 1992 : Obtention de l'examen de synthèse de l'Université de Montréal, Canada, marquant la fin de la scolarité du doctorat

Automne 1990 : Démarrage d'un Ph.D. en Géographie, Laboratoire d'Aérobiologie, Université de Montréal sous la direction du Professeur P. Comtois. Campagnes d'échantillonnage de l'ambrosie sur le terrain en 1991 et 1992 puis analyse en laboratoire. *Sujet original de la thèse* : Etude de la modélisation statistique de la dispersion des pollens d'ambrosie au niveau de la rue en centre ville de Montréal, Canada

Septembre 1989 – 1990 : M.Sc. Géographie (mention TB), Département de Géographie, Université Jean Moulin, Lyon III, France, sous la direction du Professeur Marcel Ieroux. Scolarité réalisée à l'Université de Montréal, Canada. *Sujet du mémoire* : Approche micro climatologique de l'écosystème urbain

Septembre 1986 – 1989 : Double licence en Géographie et Aménagement du Territoire, Université Jean Moulin, Lyon III, France

Juin 1986 : Baccalauréat série D – Mathématiques et Sciences de la Nature, Académie du Rhône, Lyon, France

## Publications, interventions orales et posters

Goyette-Pernot, J. et Goyette, S. (2006) Ce que peut apporter la modélisation numérique d'un nuage de pollen d'ambroisie. 18<sup>ème</sup> Colloque AFEDA, Saint-Romain-en-Gal/Vienne, France

Goyette-Pernot, J., Goyette, S. and Beniston, M. (2006) High ragweed allergy risk episodes simulation over Montreal. Poster in 8<sup>th</sup> International Congress of Aerobiology. «Towards a comprehensive vision» 21-25 August 2006, Neuchâtel, Switzerland

Goyette-Pernot, J., Goyette, S., Beniston, M., Muñoz-Alpizar, R. and Blanchet, J.-P. (2006) High resolution numerical modelling to simulate high ragweed pollen risks: a novel approach. Montreal case study. *In preparation*

Goyette-Pernot, J., Goyette, S. et Beniston, M. (2005) Quelques résultats issus de la modélisation numérique d'un nuage de pollen d'ambroisie. 17<sup>ième</sup> colloque AFEDA, Lyon, France

Goyette-Pernot, J., Goyette, S. et Beniston, M. (2005) High ragweed pollen peak simulation. In, Wengen-2005 workshop, Climate, Climatic Change and Health, Wengen, Switzerland

Goyette-Pernot, J., Muñoz-Alpizar, R., Blanchet, J.-P., Goyette, S. and Beniston, M. (2004) High resolution simulation of a ragweed pollen cloud. In, XI IPC, International Palynological Congress, Granada, Spain

Compagnon, R. and Goyette-Pernot, J. (2004) Visual comfort in Urban Spaces. Designing Open Spaces in the Urban Environment: a bioclimatic approach. Pikermi, Attiki, Greece: Centre for Renewable Energy Sources. ISBN 960-86907-2-2, pp. 27-31

Goyette-Pernot, J., Muñoz-Alpizar, R., Blanchet, J.-P., Goyette, S. and Beniston, M. (2003) Analysing ragweed pollen cloud over Montreal city center. Poster in TESA, the Third European Symposium on Aerobiology, University College Worcester, UK

Goyette-Pernot, J., Muñoz-Alpizar, R., Blanchet, J.-P., Goyette, S. and Beniston, M., (2003) First attempt of high resolution of a ragweed pollen cloud over Montreal area. Extended abstract in ICUC-5, the Fifth International Conference on Urban Climate, Lodz, Poland. Vol. 2, pp. 35-38

Goyette-Pernot, J. and Compagnon, R. (2003) RUROS – Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces project: two case studies in Fribourg, Switzerland. Extended abstract in ICUC-5, the Fifth International Conference on Urban Climate, Lodz, Poland. Vol. 2, pp. 211-214

Goyette-Pernot, J. and Compagnon, R. (2003) RUROS – Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces project: two case studies in Fribourg, Switzerland. Poster in ICUC-5, the Fifth International Conference on Urban Climate, Lodz, Poland

Goyette-Pernot, J. (2003) Impact of a city center on the dispersal of a regional pollen cloud. Case of Montreal, Canada. Geophysical Research abstracts, vol. 5, European Geophysical Society, Nice, France

Goyette-Pernot, J. (2002) Urban aerobiology: How does a Northamerican city center perturb the dispersal of a regional cloud? Case of Montreal, Canada. 7<sup>th</sup> International Congress on Aerobiology, «Aerobiology : Coming the age of a New Millenium » 5-9 August 2002, Château Montebello, Canada. Obtention d'un des prix de la plus intéressante présentation.

Goyette-Pernot, J. (1995) Comparaison des concentrations polliniques de fin d'été, à 20 mètres du sol: centre-ville de Montréal versus station témoin. Congrès de l'ACFAS, Chicoutimi, Québec, Canada

Pernot, J. and Comtois, P. (1991) Sampling sites identification for urban aerobiological modelling. Tenth Conference on Biometeorology and Aerobiology, Salt Lake City, Utah. Published by the American Meteorological Society, Boston, Mass., US