

Université de Montréal

Le contenu pollinique atmosphérique à Montréal (Québec) et les variations
climatiques interannuelles de 1985 à 1998

par
Chaïna Bapikee

Département de géographie
Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc)
en géographie

juillet, 2005

© Chaïna Bapikee, 2005



G
59
U54
2005
V. 006



AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :
Le contenu pollinique atmosphérique à Montréal (Québec) et les variations
climatiques interannuelles de 1985 à 1998

présenté par :
Chaïna Bapikée

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

Pierre André, Président du Jury

Paul Comtois, Directeur de recherche

Bhawan Singh, Membre du Jury

Résumé :

Le changement climatique et l'augmentation de la prévalence de la pollinose, communément appelée rhume des foins, ont reçu beaucoup d'attention ces dernières années, notamment l'hypothèse que le changement climatique serait responsable d'une augmentation de la prévalence des allergies. Bien que la relation entre le pollen aéroporté et les variables météorologiques soit bien connue, peu d'études ont été effectuées sur les effets des variations climatiques interannuelles sur le comportement des pollens allergènes. À cet effet, nous avons conduit une étude temporelle sur 14 années (1985-1998) à Montréal (Québec, Canada). La première étape de ce protocole consiste à examiner les conséquences des différentes définitions de paramètres polliniques (début, fin, longueur, valeur maximale, date de la valeur maximale et concentration pollinique totale de la saison pollinique) et du lissage des courbes de concentration pollinique sur la valeur maximale et la date de la valeur maximale. Cette étape nous a permis de clarifier la méthodologie à utiliser dans la seconde étape. Nous avons constaté que les méthodes impliquant des pourcentages (5%-95% ; 2.5%-97.5%) ou les points d'inflexion donnent des résultats similaires. De plus, le lissage des courbes ne devrait pas s'appliquer pour observer les valeurs maximales et les dates de valeur maximale si les données sont moyennées sur plus de trois jours, car l'information initiale est alors perdue par le lissage des courbes. La deuxième partie porte sur l'étude de la relation entre les variations annuelles de climat de 1985 à 1998 et ces mêmes paramètres polliniques. Nous avons observé que les variations de climat sont plus perceptibles sur des courtes périodes de temps comme les saisons polliniques (quelques semaines par an) plutôt que sur des années complètes. Aussi, les arbres semblent plus sensibles aux variations saisonnières de précipitation alors que les variations annuelles de température semblent plutôt influencer les graminées. Nous avons également constaté que les taxons se comportent de manière très différente : bien que les saisons polliniques soient de plus en plus longues, commencent plus tôt et finissent plus tard, il semble que la production pollinique ne présente pas un comportement homogène pour tous les taxons, alors que tous les maxima journaliers diminuent.

Mots clés : variations climatiques, pollens allergènes, paramètres polliniques, allergies, variables météorologiques, Montréal.

Abstract:

Climate change and pollinosis (commonly called hay fever) prevalence increase, have received a lot of attention in recent years and the general thought is that climate change may be responsible for an increase in the prevalence of allergies. Although the relationship between airborne pollen and meteorological variables is well known, little work has been done on the effects of interannual climate variability on the behavior of airborne allergenic pollen. For this purpose, we conducted a temporal study of 14 years (1985-1998) in Montreal (Quebec, Canada). The first step of this research protocol consists on examining the consequences of changing the definition of different pollen curve parameters (beginning, end, length, peak, peak-date and total pollen count of pollen seasons) and analyzing the effects of smoothing curves of pollen concentration on the peak-value and the peak-date: this allowed us to clarify the methodology to be used in the second part of our research. We noticed that methods using percentages (5%-95%; 2.5%-97.5%) or inflexion points gave similar results. Moreover, smoothed curves should not be used to observe peak-values and peak-dates when data are averaged over more than three days because the initial information is then lost with the smoothing technique. The second part reports the study of the relationship between climatic variations between 1985 and 1998 and pollen parameters. We found that climatic variations are more perceptible on shorter periods of time like pollen seasons (a few weeks per year) rather than on whole years. Also, trees seem to be more sensitive to variations in seasonal precipitation whereas variations in annual temperature rather influence grasses. We also found that taxa behave very differently: although the seasons are longer, beginning earlier, and ending later, it seems that pollen productivity variation is not homogeneous for all taxa while all daily maxima decreased.

Key words: climate variability, allergenic pollen, pollen parameters, allergies, meteorological variables, Montreal.

Table des matières

Table des matières.....	i
Liste des tableaux.....	iii
Liste des figures	v
Remerciements.....	vii
Introduction.....	1
Chapitre 1 ÉTAT DE LA QUESTION	4
1.1 La problématique des changements climatiques	4
1.1.1 Définition et historique.....	4
1.1.2 L'effet de serre	5
1.2 L'influence du climat et des changements climatiques sur les plantes.....	6
1.2.1 Les variables météorologiques importantes intervenant dans la vie d'une plante... 6	
1.2.2 Réaction des plantes aux variations climatiques	7
1.2.3 Réaction des plantes à une augmentation de CO ₂	9
1.3 Le comportement du pollen	10
1.3.1 De la production à la déposition du pollen anémophile	11
1.3.2 Le lien entre le pollen et les facteurs météorologiques	12
1.3.3 L'augmentation de la concentration atmosphérique de CO ₂ et le pollen	16
Chapitre 2 CADRE MÉTHODOLOGIQUE.....	18
2.1 Objectifs et cadre spatio-temporel.....	18
2.2 Données polliniques	19
2.2.1 Collecte des données et choix des espèces	19
2.2.2 Définition des paramètres.....	20
2.3 Données météorologiques.....	22
2.3.1 Collecte des données et choix des variables.....	22
2.3.2 Définition des variables.....	23
Chapitre 3 RÉSULTATS	24
3.1 Article 1	24

3.2 Article 2	42
Chapitre 4 CONCLUSION DE SYNTHÈSE	74
Bibliographie.....	78

Liste des tableaux

Tableau 1. Annual meteorological data.....	50
Tableau 2. Seasonal meteorological data.....	52
Tableau 3a. Correlation between the total precipitation during the pollen season of <i>Acer</i> and the pollen parameters of <i>Acer</i>	53
Tableau 3b. Correlation between the total precipitation during the pollen season of <i>Quercus</i> and the pollen parameters of <i>Quercus</i>	54
Tableau 3c. Correlation between the maximum temperature during the pollen season of <i>Gramineae</i> and the pollen parameters of <i>Gramineae</i>	54
Tableau 3d. Correlation between the minimum temperature during the pollen season of <i>Gramineae</i> and the pollen parameters of <i>Gramineae</i>	55
Tableau 3e. Correlation between the mean temperature during the pollen season of <i>Gramineae</i> and the pollen parameters of <i>Gramineae</i>	55
Tableau 3f. Correlation between the minimum temperature during the pollen season of <i>Ambrosia</i> and the pollen parameters of <i>Ambrosia</i>	56
Tableau 4a. Correlation between the annual maximum temperature and the pollen parameters.....	57
Tableau 4b. Correlation between the annual minimum temperature and the pollen parameters.....	58
Tableau 4c. Correlation between the annual mean temperature and the pollen parameters.....	59
Tableau 4d. Correlation between the annual total precipitation and the pollen parameters.....	60

Tableau 5. Trends of the most allergenic taxa of Montreal between 1985 and 1998..... 61

Liste des figures

Figure 1. Estimation of the beginning of the season of <i>Acer</i>	32
Figure 2. Estimation of the beginning of the season of <i>Betula</i>	32
Figure 3. Estimation of the beginning of the season of <i>Quercus</i>	32
Figure 4. Estimation of the beginning of the season of <i>Gramineae</i>	32
Figure 5. Estimation of the beginning of the season of <i>Ambrosia</i>	32
Figure 6. Estimation of the end of the season of <i>Acer</i>	33
Figure 7. Estimation of the end of the season of <i>Betula</i>	33
Figure 8. Estimation of the end of the season of <i>Quercus</i>	33
Figure 9. Estimation of the end of the season of <i>Gramineae</i>	33
Figure 10. Estimation of the end of the season of <i>Ambrosia</i>	33
Figure 11. Estimation of the length of the season of <i>Acer</i>	34
Figure 12. Estimation of the length of the season of <i>Betula</i>	34
Figure 13. Estimation of the length of the season of <i>Quercus</i>	34
Figure 14. Estimation of the length of the season of <i>Gramineae</i>	34
Figure 15. Estimation of the length of the season of <i>Ambrosia</i>	34
Figure 16. Estimation of the annual pollen count of <i>Acer</i>	35
Figure 17. Estimation of the annual pollen count of <i>Betula</i>	35

Figure 18. Estimation of the annual pollen count of <i>Quercus</i>	35
Figure 19. Estimation of the annual pollen count of <i>Gramineae</i>	35
Figure 20. Estimation of the annual pollen count of <i>Ambrosia</i>	35
Figure 21. Averaged data of the annual pollen count of <i>Quercus</i> in 1985.....	36
Figure 22. Averaged data of the annual pollen count of <i>Acer</i> in 1985.....	36
Figure 23. Annual pollen count of <i>Gramineae</i> averaged over 4 days in 1989.....	36
Figure 24. Annual pollen count of <i>Gramineae</i> averaged over 5 days in 1989.....	36
Figure 1.a. Variations in annual maximum temperature.....	50
Figure 1.b. Variations in annual minimum temperature.....	50
Figure 1.c. Variations in annual mean temperature.....	50
Figure 1.d. Variations in annual precipitation.....	50
Figure 3a. Variation of the beginning of the pollen season of <i>Quercus</i> in Montreal from 1985 to 1998.....	62
Figure 3b. Variation of the length of the pollen season of <i>Quercus</i> in Montreal from 1985 to 1998.....	62

Remerciements

Cette section s'adresse particulièrement à mon directeur de maîtrise, Paul Comtois, envers lequel je suis reconnaissante pour m'avoir permis d'entreprendre ce projet sous sa directive, mais également pour m'avoir aidée dans l'élaboration de ce travail en me faisant part de ses idées et de ses conseils.

Ce travail a également été rendu possible grâce aux données polliniques provenant du laboratoire d'aérobiologie du Département de Géographie de l'Université de Montréal.

Introduction

Les études faites sur le climat démontrent que, depuis la fin du 19^{ème} siècle, la température moyenne de la Terre a augmenté de $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ (Houghton *et al.*, 2001). La Terre subit l'effet d'un réchauffement climatique qui s'amplifie depuis la révolution industrielle et les observations montrent que, depuis 1861, la décennie 1990 est la plus chaude et que l'année la plus chaude enregistrée est 1998 (Houghton *et al.*, 2001). Mc Carthy *et al.* (2001) définissent les glaciers, les forêts tropicales et boréales, les écosystèmes polaires et alpins comme faisant partie des systèmes naturels, et l'agriculture, la foresterie, ou encore la santé humaine comme appartenant à la catégorie des systèmes humains. Selon eux, ces deux systèmes sont particulièrement vulnérables et sensibles aux changements climatiques.

Les conséquences d'un potentiel changement climatique se feraient davantage sentir dans les régions de hautes latitudes, comme par exemple le Canada ; parmi les préoccupations relatives à la santé figurent les complications dû à l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur, des événements extrêmes (i.e. orages, cyclones) et de la pollution atmosphérique, et les problèmes liés à l'extension de maladies à transmission vectorielle (par exemple, la malaria ou la dengue) ; ces événements sont parmi ceux qui reçoivent le plus d'attention en ce qui a trait à l'impact du changement climatique sur la santé humaine (Lemmen et Warren, 2004).

Selon Beggs (2004), les effets possibles du changement climatique sur les pollens allergènes et la santé humaine sont une réalité et il est aujourd'hui évident que le phénomène a déjà, et aura à l'avenir, des impacts sur le comportement des pollens allergènes. L'augmentation des températures et du dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique pourraient influencer directement les allergies, car ils provoqueraient une croissance accrue des plantes et une production plus ample du pollen des plantes allergènes ; il y aurait donc une augmentation de la concentration atmosphérique pollinique (Ziska, 2000 ; Teranishi *et al.*, 2000).

L'étude scientifique du contenu pollinique de l'air a débuté à la suite de la deuxième guerre mondiale et aujourd'hui, grâce aux banques de données polliniques, il est possible d'analyser des tendances polliniques à long terme et de prédire quelles seront les concentrations atmosphériques futures (Laaidi *et al.*, 1997). De plus, une meilleure compréhension du lien entre le pollen aéroporté et les variables météorologiques ainsi que la visualisation des effets des récentes variations climatiques sur l'émission et la dispersion du pollen sont autant d'éléments qui permettent de déterminer le rôle des variations climatiques actuelles sur la concentration pollinique.

Toutefois, peu d'études ont été effectuées sur les effets potentiels du changement climatique sur la production de pollen allergène (Wayne *et al.*, 2002). Dans un souci d'adaptation à l'augmentation du contenu pollinique atmosphérique supposément causée par les fluctuations climatiques récentes (c'est-à-dire depuis la dernière révolution industrielle), les recherches dans ce domaine se doivent d'être entamées afin de prévenir et de réduire les effets néfastes des variations climatiques ; le défi qui se pose est de trouver différents moyens d'améliorer les stratégies d'adaptation et de réduire la vulnérabilité des personnes allergiques au pollen (Burton, 1997). L'étude de la relation entre les fluctuations récentes de climat et le comportement des pollens allergènes est donc importante afin d'anticiper les impacts négatifs sur la santé humaine.

Dans cette perspective, notre travail tentera de déterminer les liens entre le contenu pollinique atmosphérique à Montréal (Québec, Canada) et les variations climatiques interannuelles entre 1985 et 1998. Les pollens à l'étude proviennent des taxons les plus allergènes de la région, à savoir, les érables (*Acer* spp.), les bouleaux (*Betula* spp.), les chênes (*Quercus* spp.), les graminées (*Gramineae*) et l'ambrosie (*Ambrosia* spp.). Notre hypothèse de recherche est fondée sur l'existence d'un lien entre les variations climatiques et le comportement des taxons polliniques allergènes. L'hypothèse sera testée au niveau de la présence de pollen atmosphérique puisque les

données retenues sont des comptes polliniques quotidiens qui serviront d'indicateurs phénologiques.

Le présent mémoire est divisé en 4 chapitres distincts. Le premier chapitre est entièrement consacré à une recherche bibliographique et dresse le contexte dans lequel se situe la présente étude. Ainsi, on y retrouve une explication générale des changements climatiques et particulière du réchauffement global d'origine anthropique ; il s'en suit un état des connaissances de la relation entre le développement des plantes, le climat et les variations climatiques d'une part, et d'autre part, une synthèse des études portant sur le comportement du pollen face au climat et aux variations climatiques. Le second chapitre est consacré au cadre méthodologique. Nous y détaillons les objectifs visés, le cadre d'étude et les procédés entrepris tout au long du travail, depuis la collecte et le choix des données polliniques jusqu'à celles des données météorologiques. Les résultats sont présentés au Chapitre 3 sous la forme de 2 articles soumis pour publication. Le premier article, d'ordre méthodologique, a pour objectif de faire le point sur la méthode la plus adaptée à notre étude: plusieurs paramètres peuvent être utilisés pour représenter une saison pollinique (i.e. début, fin ou encore longueur de la saison pollinique) ; pour chacun de ces paramètres il existe différentes définitions et donc, plusieurs méthodes d'analyse. Le but de ce premier article consiste à assigner à chacun de ces paramètres plusieurs définitions – et donc plusieurs méthodes – et d'observer le profil des courbes polliniques et des droites de tendance multi annuelles pour chacun de ces paramètres. La technique consistant à lisser les courbes a également été appliquée aux courbes annuelles de pollen afin de tester si la valeur maximale et la date de la valeur maximale sont les mêmes après lissage. Le second article, le cœur même du travail, consiste en une analyse statistique des données polliniques (érables, bouleaux, chênes, graminées, herbacées) et météorologiques (température et précipitation) afin de dégager la relation entre les variations climatiques et le comportement des taxons polliniques allergènes de Montréal de 1985 à 1998. Enfin, le Chapitre 4 présente une conclusion de synthèse.

CHAPITRE 1

ÉTAT DE LA QUESTION

1.1 La problématique des changements climatiques

1.1.1 Définition et historique

Les changements climatiques correspondent à une modification du climat moyen et à une transformation à long terme des conditions climatiques d'une région donnée. Cela se traduit par des écarts de température, des changements dans la fréquence des événements extrêmes, des modifications de la configuration des vents, des précipitations, du niveau de la mer et des tempêtes (Ministres de l'énergie et de l'environnement, 2002¹).

Les changements climatiques ne sont pas chose nouvelle ; ils se sont déjà produits dans le passé et durant des millions d'années la Terre a subi de nombreuses variations climatiques (Peters et Lovejoy, 1992). Plus récemment, la Terre subit l'effet d'un réchauffement exceptionnellement rapide : l'augmentation de la température durant la première moitié du 20^{ème} siècle n'a jamais été aussi alarmante depuis l'époque médiévale (Ford, 1982).

¹ Ministres de l'énergie et de l'environnement. 2002. *Plan national d'activités 2002 du Canada sur les changements climatiques*. Site du Processus national sur les changements climatiques, [Document officiel, en ligne]. http://www.nccp.ca/NCCP/pdf_f/Bus_Plan2002_W_Cover_FR.pdf (page consultée en février 2003)

Les études effectuées depuis la dernière décennie démontrent l'avènement d'un réchauffement climatique global causé par l'action humaine. Les raisons du changement actuel ne sont plus les mêmes que celles enregistrées à l'échelle géologique. Il est possible d'associer les périodes de variabilité climatique passées à des phénomènes tels que le volcanisme ou l'activité du soleil, mais le réchauffement observé depuis la dernière révolution industrielle est attribué aux activités humaines (Bergeron *et al.*, 1997) :

Depuis les 50 dernières années, les sociétés humaines ont davantage recours à la haute technologie, aux machines, à l'utilisation de combustibles fossiles, à l'agriculture intensive, autant de faits qui ont contribué à augmenter la quantité de gaz à effet de serre² dans l'atmosphère, et en particulier, la concentration atmosphérique de CO₂ (Houghton *et al.*, 2001). Bien que l'Homme ne puisse changer le principe de l'effet de serre – qui est un phénomène physique normal de l'atmosphère – il a réussi à en modifier la composition en augmentant la quantité d'énergie retenue par elle, ce qui a donc eu pour conséquence de renforcer l'effet de serre. C'est ce déséquilibre climatique que l'on désigne à juste titre de « réchauffement global » plutôt que d'« effet de serre » (Villeneuve et Richard, 2001).

1.1.2 L'effet de serre

Villeneuve et Richard (2001) décrivent l'effet de serre comme étant un phénomène naturel qui permet de maintenir la température moyenne à la surface de la Terre à environ 15° Celsius (°C). Si le phénomène n'existait pas, la température moyenne fléchirait selon eux à -18°C avec des nuits beaucoup trop froides et des journées outrageusement chaudes. À l'échelle de la Terre, certains rayons du soleil traversent l'atmosphère pour être absorbés par la Terre qui se réchauffe tandis que d'autres sont renvoyés dans l'espace. Une fois ces rayons absorbés par la Terre, le sol renvoie dans

² Dioxyde de carbone (CO₂), méthane (CH₄), ozone troposphérique (O₃), protoxyde d'azote ou oxyde nitreux (N₂O) et chlorofluorocarbones (CFC).

l'atmosphère – sous forme de radiations infrarouges – de la chaleur qui est absorbée, entre autres, par le CO₂.

Ainsi, quand l'atmosphère est réchauffée, la Terre l'est également. En effet, lorsque la quantité de gaz à effet de serre est accrue, il y a plus de radiations infrarouges qui sont absorbées par l'atmosphère et la température globale augmente. En amplifiant la quantité des gaz à effet de serre (et surtout du CO₂) dans l'atmosphère, l'Homme a donc augmenté la capacité de réchauffement de l'effet de serre naturel. Ce qui est inquiétant n'est pas le phénomène lui-même puisqu'il est essentiel à notre existence ; par contre, la modification de la composition de l'atmosphère par les activités humaines est porteuse de dangers potentiels.

1.2 L'influence du climat et des changements climatiques sur les plantes

1.2.1 Les variables météorologiques importantes intervenant dans la vie d'une plante

Les plantes sont les premiers groupes d'organismes vivants sur lesquels l'influence du temps et du climat a clairement été observé et reconnu. Le climat est déterminé par des variables météorologiques (i.e. précipitations, température, radiation, vent) qui ont une grande influence sur le développement des plantes, leur distribution et leurs maladies ; parmi celles-ci, l'eau du sol et la température sont les deux plus importantes variables intervenant dans presque tous les aspects de croissance d'une plante (Tromp, 1980). Dépendamment de l'environnement dans lequel elles évoluent, les plantes parviennent généralement à bien s'adapter. Par exemple, les plantes des climats humides ont une consommation plus élevée d'eau, comparativement aux plantes se trouvant sous les climats secs (Zhang *et al.*, 2004).

La température joue un important rôle dans l'ouverture des fleurs printanières (Van Doorn, 2003). Cependant, bien que la température à elle seule soit un important intervenant dans le processus de développement des plantes, c'est l'association des

températures et de l'eau (humidité et précipitations) qui offre les meilleures conditions pour favoriser la croissance des plantes. Par exemple, un hiver doux combiné à un environnement humide stimulera davantage la production des plantes au printemps (Pitt et Heady, 1978).

Parmi les variables climatiques autres que la température et les précipitations figurent la radiation, qui régule le développement et la croissance de la plante (Tromp, 1980) et le vent qui accélère l'évaporation et amplifie l'effet de sécheresse (Villeneuve et Richard, 2002). Enfin, plusieurs aspects du développement d'une plante dépendent de sa réponse à la présence ou à l'absence de la lumière (Whatley et Whatley, 1980).

1.2.2 Réaction des plantes aux variations climatiques

Les plantes sont non seulement très sensibles au climat, mais également aux variations climatiques. L'influence du réchauffement climatique sur les plantes est aujourd'hui indéniable et de nombreuses espèces végétales ont déjà subi les conséquences des récents changements de température. Parmi les réponses probables de la végétation au réchauffement climatique actuel figurent notamment, la migration des espèces vers le nord, l'augmentation de la densité des espèces et les changements dans le comportement des plantes (Root *et al.*, 2003). Aussi, lors de la période de croissance, la morphologie des plantes (i.e. le diamètre des tiges) devient plus importante sous l'effet de températures plus chaudes (Coleman et Bazzaz, 1992). Ces types de changements seront d'ailleurs davantage marqués aux latitudes et altitudes élevées, là où la végétation est plus sensible aux fluctuations de température (Walker et Steffen, 1997 ; Moen *et al.*, 2004).

Les systèmes naturels tels que les forêts boréales et tropicales par exemple, sont considérés à risque et sont particulièrement vulnérables au changement climatique à cause de leur capacité adaptative limitée ; ainsi, alors que certaines espèces proliféreront sous l'effet de l'augmentation des températures, d'autres seront amenées à disparaître (McCarthy *et al.*, 2001). Le réchauffement climatique affecte déjà les

plantes de hautes latitudes, car plusieurs espèces ont tendance à migrer vers le nord ; de plus, le changement des températures pourrait causer la perte et l'extinction des plantes de haute altitude (Grabherr *et al.*, 1994).

L'augmentation des températures affecterait grandement la croissance, la productivité et la composition des plantes (Teeri, 1988) et il semble même que l'accroissement des températures nocturnes ait un impact sur les plantes, et particulièrement sur la production pollinique des fleurs. Dans une étude expérimentale, Zheng *et al.* (2002) démontrent une augmentation du nombre de fleurs émises par le soja après que la plante ait été exposée à des températures nocturnes plus chaudes.

Au même titre, les températures trop chaudes et les températures trop froides pourraient causer des dommages irréversibles au niveau des cellules et des membranes des plantes. Dans le premier cas, les hautes températures affecteraient non seulement la croissance mais également le processus de photosynthèse (Weis et Berry, 1988). Dans le deuxième cas, les températures brusquement basses favoriseraient la formation de cristaux de glace entre les cellules, entraînant ainsi leur destruction, ce qui aurait pour effet de porter préjudice à la plante (Pitt et Heady, 1978).

Selon Dawson (1992), les changements climatiques passés ont eu des conséquences sur le comportement, la distribution et la reproduction des espèces. Une étude palynologique sur la réponse de la végétation face au changement climatique durant le récent quaternaire montre que, lorsque le climat chaud et sec a fait place à un climat chaud et humide, le couvert de la végétation s'est conséquemment développé et est devenu beaucoup plus dense (Schlütz et Zech, 2004).

Les études sur le passé aident à comprendre et à évaluer les conséquences des variations climatiques actuelles. L'analyse des fossiles de pollens et de petits mammifères permet d'évaluer les impacts du changement climatique sur la faune et

sur la flore, notamment sur la distribution des plantes. En effet, les fossiles contiennent une multitude d'information sur les conditions climatiques dans lesquelles les espèces, aussi bien animales que végétales, évoluaient autrefois. Ces analyses mettent en évidence toute modification dans la distribution et l'abondance de certaines espèces suite aux changements climatiques passés, comme par exemple, la disparition d'espèces dans certaines régions (Peters et Lovejoy, 1992).

L'impact des changements climatiques passés sur plusieurs espèces est bien réel, et si de tels changements ont aujourd'hui été démontrés, les effets sur les espèces et les écosystèmes se feront davantage sentir d'ici 2100, date à laquelle est prévue une augmentation de 6°C (Root *et al.*, 2003 ; Houghton *et al.*, 2001). Déjà, Ford (1982) montrait que le bouleau nain (*Betula nana*), qui ne peut se développer qu'à des endroits où la température n'excède pas 22°C, serait amené à disparaître de certaines régions si la température dépassait 22°C. La modification du climat pourrait donc avoir des répercussions sur la disparition régionale de plusieurs espèces à cause de leur incapacité de se disperser et de s'accommoder suffisamment vite.

1.2.3 Réaction des plantes à une augmentation de CO₂

De manière générale, les concentrations élevées de CO₂ sont vraisemblablement susceptibles de favoriser davantage la croissance et la productivité des plantes (Lemon, 1983 ; Hughes, 2000). Les effets sur la biomasse (feuilles, branches, tiges, racines et appareil reproductif) seraient amplifiés tel qu'il a été démontré dans une étude menée par Coleman et Bazzaz (1992). Ils établissent, entre autres, que les plantes exposées à un niveau de CO₂ élevé développent plus de racines, ce qui leur permet une plus large manœuvre au niveau de sol, et donc une consommation plus efficace d'eau. Ceci aurait donc un impact sur le développement tout entier de la plante. Dans le passé, l'augmentation de la concentration atmosphérique de CO₂ durant la dernière glaciation (il y a environ 18000 ans) a directement contribué à un changement dans la végétation : les plantes C₄ (catégorie de plantes rencontrées surtout dans les climats tropicaux et tempérés) ont laissé place aux plantes C₃

(catégorie de plantes caractéristiques des climats froids, incluant les arbres) (Cole et Monger, 1994). Enfin, une augmentation du CO₂ accroîtrait la production de graines durant la période de croissance et de reproduction des plantes, comme c'est le cas pour le soja par exemple (Nakamoto *et al.*, 2004).

1.3 Le comportement du pollen

Les grains de pollens sont les corps reproducteurs mâles des plantes, libérés par les anthères³ arrivées à maturité. Il existe plusieurs types de pollinisation chez les plantes. Dépendamment des différentes caractéristiques du pollen – taille, poids ou forme – et de l'environnement dans lequel ce dernier évolue, le grain peut être transporté soit par le vent, soit par les insectes, soit par les animaux. On dit alors qu'ils proviennent respectivement de plantes anémophiles, entomophiles ou zoophiles (Lewis *et al.*, 1983).

Les plantes anémophiles bénéficient de la méthode de pollinisation la plus primitive : la pollinisation par le vent. Si la majorité des espèces sont entomophiles ou zoophiles, la majorité des arbres et les herbacées rencontrés sous nos climats sont anémophiles. L'émission de pollen est généralement abondante afin de compenser les faibles chances qu'a un pollen d'atteindre sa destination finale, c'est-à-dire, la partie femelle (stigmate) d'une plante. À chaque grain de pollen qui atteint sa destination correspond plusieurs autres milliers qui se perdent. Cet égarement constitue dans le cas de pollens allergènes, la cause de la plupart des rhumes des foins (Wodehouse, 1959).

³ Organe constituant la partie supérieure de l'étamine dont la fonction est la production de grains de pollens (Raghvan, 1997).

1.3.1 De la production à la déposition du pollen anémophile

La présence de pollen dans l'air résulte de différentes étapes successives. En premier lieu, la production du pollen dépend de la capacité de croissance de la plante (facteurs génétiques) et de la superficie de terrain occupée par la plante (Barnes *et al.*, 2001).

Dans un deuxième temps, la libération du pollen est le processus par lequel les grains sont libérés dans l'air. Elle s'effectue au moment où ceux-ci sont expulsés des anthères (Barnes *et al.*, 2001). Selon Knox (1979), la libération est une importante étape et se déroule en 2 phases :

- 1) *L'ouverture des anthères* dépend de la température et de l'humidité relative. Les pollens libérés sont partiellement déposés sur la surface des plantes adjacentes. Ils ne sont pas immédiatement dispersés, mais ils sont dans un premier temps relâchés sous la forme d'amas de grains et déposés sur les feuillages et les tiges.
- 2) *L'émission* s'effectue à partir des pollens présents sur la surface des plantes. Une fois que les pollens libérés sont secs, ils sont soufflés par le vent. Par conséquent, l'émission est contrôlée par la vitesse du vent et la turbulence.

Par la suite la dispersion du pollen est possible grâce au vent qui permet aux grains d'être aéroportés puis éparpillés (Gregory, 1973 ; Laaidi, 2001). Le transport pollinique est possible une fois que les grains de pollen, humidifiés par la rosée du matin, sèchent. Plus légers, ils peuvent alors se répandre aux alentours par les airs. Il est à noter que la quantité de pollen dans l'air est généralement au plus bas à 6h00 du matin (juste après le lever du soleil), et au plus haut aux environs de midi, une fois que les grains de pollens secs sont transportés dans les airs (Barnes *et al.*, 2001).

Finalement, la déposition intervient quand le grain de pollen quitte l'atmosphère pour se déposer sur une surface. Cette étape est aussi le prélude nécessaire pour une germination (Gregory, 1973).

1.3.2 Le lien entre le pollen et les facteurs météorologiques

La concentration de pollen dans l'air fluctue avec les changements de temps et les raisons biologiques telles que la croissance des organes producteurs (Gregory, 1973). Avant l'anthèse, moment où les grains de pollen sont expulsés de l'anthère, ce sont les facteurs génétiques ou physiologiques, qui agissent sur la productivité pollinique. Après l'anthèse, ce sont toujours les paramètres météorologiques qui influencent le développement pollinique, car la fleur a fini d'émettre son pollen (Comtois et Boucher, 1996). La fin de la saison pollinique est donc difficile à prédire puisqu'elle dépend plus des conditions météorologiques environnantes que de la biologie des plantes.

De manière générale, la production, la libération et la dispersion des grains de pollen sont influencées par trois types de facteurs météorologiques (Laaidi *et al.*, 1997 ; Laaidi, 1997) :

- 1) Les *facteurs primaires* interviennent directement sur la biologie des plantes (croissance des plantes, développement floral), commandent la maturation et conditionnent la production de pollen. Parmi ces facteurs figurent la température, l'ensoleillement (le rayonnement solaire direct est indispensable au développement des bourgeons floraux) et les précipitations qui se doivent d'être relativement abondantes afin de couvrir les besoins en eau des plantes.
- 2) Les *facteurs secondaires* favorisent la libération des grains de pollens qui s'effectue généralement par beau temps chaud et sec. Les facteurs météorologiques contribuant à cette libération sont une forte montée de température en cours de journée et une pression atmosphérique élevée. Par contre un fort taux d'humidité relative (>80%) et la présence de pluie freineront l'ouverture des étamines, et donc, la libération des grains de pollen.
- 3) Enfin, les *facteurs tertiaires* agissent sur la dispersion du pollen : le vent principalement permet aux grains de s'éparpiller dans l'atmosphère.

Jossart et ses collaborateurs (2002) ont établi une synthèse des liens entre le pollen et le climat, et ont démontré, à partir d'une bibliographie exhaustive, l'existence d'un lien réel entre la productivité pollinique et les variables météorologiques. Selon eux, certaines études en paléoclimatologie ont permis de reconstituer – à partir de l'analyse des sédiments – les conditions climatiques régionales passées. Gajewski (1987) a démontré, à partir de l'analyse des sédiments du Nord-Est Américain, qu'au cours de l'épisode chaud médiéval⁴, il s'est produit une hausse de la concentration de pollen atmosphérique. Ces résultats suggèrent que si une telle hausse peut être associée aux épisodes climatiques plus chauds de l'Holocène⁵, il est fort probable que cela se reproduise si les variations climatiques actuelles engendrent un réchauffement climatique global. De plus, des résultats d'analyses polliniques ont mis en évidence une hausse dans la concentration de plusieurs espèces associées aux conditions de températures moyennes annuelles plus chaudes (1 à 2°C) à la latitude de Montréal il y a 6000 ans avant aujourd'hui (Richard, 1998).

Il est généralement admis que les variables météorologiques ont une influence sur la production et le développement pollinique : « pollen is greatly influenced by the meteorological conditions » (Laaidi, 2001, p. 1), et que la présence de pollen varie en fonction des conditions météorologiques : « major weather parameters have long been known to alter airborne pollen and spore concentrations » (Barnes *et al.*, 2001, p. 61). Les caractéristiques de la saison pollinique peuvent aussi être influencées par les conditions météorologiques existantes lors de la période qui précède la floraison des

⁴ 1000 ans avant aujourd'hui ; augmentation de 1 à 2°C

⁵ L'Holocène désigne le Quaternaire récent, postglaciaire. De fait, le début de cette période fut marqué par un accroissement très net des températures sur l'ensemble du globe et par le retrait des glaciers. Toutefois, durant cette courte période (environ 10 000 à 12 000 ans), le climat a aussi enregistré des fluctuations : le Petit Âge glaciaire, qui sévit entre le XV^e et le début du XVIII^e siècle, vit ainsi des hivers très rudes et une nouvelle avancée des glaciers.

arbres (Galán *et al.*, 1998 ; Fornaciari *et al.*, 1997). Ceci s'explique par le cycle de certaines espèces végétales qui varie selon leur type. C'est le cas de *Betula*, *Alnus*, *Quercus* et *Fagus* qui ont un cycle biennal (Andersen, 1980).

1.3.2.1 La température et le pollen

La littérature relate que le principal facteur ayant un impact sur la concentration atmosphérique et la production de pollen est la température (Galán *et al.*, 2001 ; Ford, 1982). En plus d'influencer la croissance et le développement de la plante, elle détermine l'apparition et la durée de la saison pollinique et est responsable des fluctuations de la concentration de pollen dans l'atmosphère (Lowry, 1969 ; Galán *et al.*, 2000). Les hautes températures conduisent à une augmentation de la quantité de pollen dans l'air et ont un effet direct sur l'émission de pollen : les anthères des espèces anémophiles ne s'ouvrent que dans des conditions météorologiques favorables telles qu'un temps chaud et sec (Knox, 1979). Higham (1998) a montré que dans les mêmes conditions climatiques, la concentration atmosphérique de pollen augmente graduellement. Une étude temporelle menée par Galán *et al.* (2000) sur l'influence des variables météorologiques sur la quantité de pollen dans l'air rapporte que, suite à des températures inhabituellement élevées et à une absence de précipitations, le début de la période de floraison est prématuré par rapport aux années précédentes. L'accroissement de la température prédit par les scénarios climatiques affecterait probablement la floraison des plantes et la dispersion du pollen dans l'air (Rasmussen, 2002). Finalement, Teranishi *et al.* (2000) démontrent qu'une augmentation de la température influence l'apparition du premier jour de la saison pollinique (qui s'avère être plus tôt).

1.3.2.2 Les précipitations et le pollen

Les averses, et plus précisément leur intensité ont des conséquences directes sur la quantité de pollen atmosphérique ; le moment de la journée où elles se produisent a

plus ou moins d'effet sur la concentration moyenne quotidienne de pollen. Une averse matinale influence peu la concentration moyenne quotidienne de pollen car la pluie ne fait que retarder le moment de la dispersion de pollen dans l'air. Par contre, une pluie en fin d'après-midi réduit significativement la concentration moyenne de pollen dans l'air, car les nuages de pollen ont eu le temps de se former durant la journée (Tromp, 1980).

En règle générale, pendant l'averse, la présence de pollen dans l'air est systématiquement réduite, que ce soit durant les faibles pluies (Mandrioli *et al.*, 1998), ou lors de fortes averses (Galán *et al.*, 2000 ; Barnes *et al.*, 2001). Lors d'averses fortes et prolongées, les précipitations ont pour effet de lessiver complètement l'air de la présence de pollen (Bauman, 1996; Celenza *et al.*, 1996). Bien que les précipitations aient pour effet de diminuer la quantité de pollen dans l'air, il s'avère que cette réduction soit temporaire. Après une chute de pluie, il se produit l'effet inverse ; la concentration atmosphérique de pollen augmente rapidement (Knox, 1979).

Une étude concernant une épidémie d'asthme survenue à la suite d'un violent orage en Angleterre dans la nuit du 24 au 25 juin 1994 a révélé que l'épidémie est dû à une augmentation rapide de la quantité de pollen dans l'air suite à l'orage (Higham, 1998). L'explication est la suivante. Avant la journée de l'orage, le vent a contribué à augmenter le contenu particulaire de l'atmosphère en accumulant les particules aéroportées de toute taille et de toute nature. Les violentes rafales qui ont surgi environ une heure avant l'orage ont permis aux pollens de largement se disséminer dans l'air. Une fois que la pluie est apparue, elle a précipité les grains de pollen au sol, ce qui a eu pour effet de les fragmenter et de favoriser la libération de multitudes de particules allergéniques capables de pénétrer plus facilement dans les alvéoles pulmonaires. C'est donc au travers des gouttes de pluie que les particules lessivées de l'atmosphère sont directement déposées au sol (Gregory, 1973).

1.3.2.3 Les autres variables météorologiques et le pollen

Comme il a été vu dans le précédent paragraphe, le vent influence la concentration pollinique. C'est le facteur tertiaire qui intervient dans la dispersion des grains de pollen dans l'air : « wind exerts an important influence on the dispersal of all anemophilous pollen » (Emberlin et Norris-Hill, 1996, p. 28). Il permet aux particules en suspension de voyager soit sur de courtes distances, soit d'atteindre la strate supérieure de l'atmosphère et de parcourir de longues distances avant d'être déposées (Knox, 1979). Selon Emberlin et Norris-Hill (1996), plusieurs aérobiologistes ont rapporté qu'il existe des relations significatives entre la vitesse du vent et la concentration quotidienne de pollen en ceci que le vent a pour effet de disséminer le pollen. Cependant, il semble difficile de dissocier les effets de la vitesse du vent sur la concentration de pollen des autres variables météorologiques telles que l'humidité relative, les précipitations et la température.

L'humidité relative est une autre variable influençant le pollen (Emberlin et Norris-Hill, 1996). Cependant, peu d'études se sont intéressées à l'influence de l'humidité relative sur le pollen. Il apparaît que cette variable ne puisse être analysée indépendamment des autres variables. Par contre, couplée à d'autres facteurs météorologiques, l'humidité relative joue un rôle sur la concentration de pollen atmosphérique. Hamilton (1957) par exemple, montre que la concentration de pollen décroît avec la pluie, mais augmente de façon significative avec une hausse de la température, le point de rosée et l'humidité relative.

1.3.3 L'augmentation de la concentration atmosphérique de CO₂ et le pollen

Selon Teranishi *et al.* (2000), le début de la saison pollinique du cèdre japonais commence plus tôt avec l'augmentation des températures entre 1983 et 1998. Ils affirment que les changements de température (à la hausse) influencent l'augmentation de la quantité de pollen et l'allongement de la saison pollinique : « Global warming is a probable cause not only for the earlier beginning of the pollen

season but also increase in total pollen counts, as well as a longer pollen season » (Teranishi *et al.*, 2000, p. 68). Une étude menée par Ziska et ses collaborateurs (2000) concernant l'impact du changement climatique sur la production de pollen d'ambroisie met en évidence deux principaux paramètres (température et CO₂) qui agissent sur la productivité pollinique, les propriétés allergènes des plantes et la concentration de pollen dans l'air.

En résumé, les conditions climatiques influencent le développement et la croissance des plantes. Les variations climatiques et notamment le réchauffement du climat auraient un impact sur le comportement des plantes : les espèces auraient tendance à migrer davantage vers le nord, on assisterait à une augmentation de la densité des espèces ainsi qu'à des changements dans le comportement des plantes. Une augmentation de CO₂ aurait pour conséquence de favoriser la croissance et la productivité des plantes. Les variables météorologiques ont également une influence sur la production de pollen, et la température, en particulier, est le principal facteur ayant un impact sur la concentration atmosphérique de pollen. Enfin, les précipitations auraient pour effet de réduire la quantité de pollen aéroporté.

CHAPITRE 2

CADRE MÉTHODOLOGIQUE

2.1 Objectifs et cadre spatio-temporel

Est-ce que les récentes fluctuations de climat exercent un rôle sur le comportement pollinique des espèces les plus allergènes de Montréal ? Pour tenter de le savoir, nous avons choisi d'étudier la relation entre les variations annuelles de climat entre 1985 et 1998 et les paramètres polliniques représentant les phases les plus significatives des saisons polliniques (début, fin, longueur, valeur maximale, date de la valeur maximale et concentration pollinique totale de la saison pollinique). L'intervalle d'étude a été fixé à 1985-1998 en raison de la disponibilité et de la cohérence des données aussi bien polliniques que météorologiques. De plus, cet intervalle inclut la décennie 1990, et en particulier l'année 1998, considérées comme étant les plus chaudes depuis 1896 (Houghton *et al.*, 2001). Notre hypothèse stipule que les fluctuations climatiques récentes entraînent une modification des saisons polliniques en ceci que ces dernières sont de plus en plus longues, commencent plus tôt et finissent plus tard, que la valeur maximale de concentration de pollen est plus élevée et que la concentration pollinique annuelle est plus importante.

Le climat de Montréal est de type tempéré continental, avec des hivers longs et froids, et des étés courts et chauds. Elle affiche une température annuelle moyenne de 6,1°C et une moyenne annuelle des précipitations de 966.8 mm, incluant 214.2 cm de neige

(Environnement Canada⁶). Montréal appartient à une zone de bois-francs, de pins et de pruches, et d'un point de vue pollinique, Montréal est dominé par l'ambroisie (Comtois et Gagnon, 1988).

2.2 Données polliniques

2.2.1 Collecte des données et choix des espèces

L'appareil utilisé pour collecter les données polliniques de Montréal est un capteur volumétrique hebdomadaire de type Burkard⁷, doté d'une girouette qui le positionne face au vent. Il aspire 10 litres d'air par minute à travers un orifice de 2x14mm, ce qui correspond à la quantité d'air respirée par un adulte au repos. Le capteur est situé sur le toit du Département de Géographie de l'Université de Montréal (à 15 mètres de hauteur) et la récolte des données se fait généralement d'avril à octobre chaque année. Les particules aspirées sont impactées sur un ruban de type « Melinex » enduit d'un adhésif de glycérine/gélatine. Après une semaine d'échantillonnage, le ruban est découpé en cycles de 24 heures. Les pollens sont ensuite colorés au rouge fuschine en vue de faciliter leur identification, puis une seconde couche de gélatine/glycérine et une lamelle sont superposées au ruban avant le décompte et l'identification. L'analyse se fait par la suite par la méthode des quatre lignes longitudinales (Mendrioli *et al.*, 1998) à l'aide d'un microscope optique (400 fois) Leitz Laborlux et nous obtenons alors des comptes polliniques moyens quotidiens (en grains de pollen par mètre cube d'air : p/m³).

⁶

http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/results_f.html?Province=ALL&StationName=montreal&SearchType=BeginsWith&LocateBy=Province&Proximity=25&ProximityFrom=City&StationNumber=&IDType=MSC&CityName=&ParkName=&LatitudeDegrees=&LatitudeMinutes=&LongitudeDegrees=&LongitudeMinutes=&NormalsClass=A&SelNormals=&StnId=5415& (June, 2005).

⁷ <http://www.burkard.co.uk/7dayst.htm> (page consultée en février 2004)

Les taxons sélectionnés pour l'étude émettent des pollens anémophiles allergènes dont l'inhalation est une des causes menant à l'apparition de symptômes de maladies respiratoires chez l'humain (Epton *et al.*, 1997). Ces pollens sont associés aux différentes saisons de croissance : les érables (*Acer* spp.), les bouleaux (*Betula* spp.) et les chênes (*Quercus* spp.) pour la floraison printanière, l'ensemble des graminées (*Graminea*) pour la floraison estivale et l'ambroisie (*Ambrosia*) pour la floraison automnale (Gregory, 1973 ; Knox, 1979 ; Wodehouse, 1959).

2.2.2 Définition des paramètres

Une saison pollinique peut être représentée par différents paramètres. Chaque paramètre peut avoir plusieurs définitions. Les paramètres retenus sont les suivants :

- Début de la saison (exprimée en date julienne)

Quatre définitions ont été choisies afin de caractériser le début de la saison pollinique. Teranishi *et al.* (2000) définissent le début de la saison pollinique comme étant le premier jour où au moins 3 grains de pollen par cm^2 (p/cm^2) sont déposés après le 1^{er} janvier ou le premier jour où il y a 1 grain de pollen/ cm^2 durant au moins 3 jours consécutifs. Nous avons adapté cette définition car leurs auteurs travaillent par gravimétrie plutôt que par volumétrie : nous avons remplacé l'unité de mesure (ici en p/cm^2) par p/m^3 en vue de rétablir l'unité de mesure des comptes polliniques quotidiens. Dans une autre étude, le début de la saison est défini comme étant le jour où la somme cumulative des grains de pollen/ m^3 atteint 2,5% de la concentration de pollen atmosphérique totale de l'année (Rasmussen, 2002). Le premier jour de la saison peut aussi être déterminé à partir des points majeurs d'inflexion de la courbe cumulée croissante (Pathirane, 1975). Enfin, Nilsson et Persson (1981) définissent le début de la saison pollinique comme le jour où la somme cumulative des pollens atteint au moins 5% de la concentration de pollen atmosphérique totale de l'année. Toutes ces définitions seront testées dans l'article 1 et celle utilisée par Rasmussen (2002) sera retenue pour l'article 2 (voir Chapitre 3).

- Fin de la saison (exprimée en date julienne)

Tout comme pour le début de la saison pollinique, quatre définitions ont été retenues pour définir la fin de la saison pollinique. Teranishi *et al.* (2000) définissent le dernier jour de la saison pollinique comme le moment où au plus 2 grains de pollen/cm² sont déposés dans l'air. Comme précédemment, cette définition fait l'objet d'un ajustement à « p/m³ ». Dans la deuxième étude, Rasmussen (2002) détermine la fin de la saison pollinique lorsque la somme cumulative atteint 97,5% de la concentration de pollen atmosphérique totale de l'année. Pathirane (1975) utilise également les points d'inflexion pour situer la fin de la saison. Finalement, pour Emberlin et Norris (1996), la fin de la saison correspond au jour où la somme cumulative des pollens atteint au plus 95% de la concentration de pollen atmosphérique totale de l'année. Toutes ces définitions seront également testées dans l'article 1 et celle utilisées par Rasmussen (2002) sera retenue pour l'article 2 (voir Chapitre 3).

- Durée de la saison (exprimée en nombre de jours)

La durée de la saison pollinique est le nombre total de jours compris entre le début et la fin de la saison pollinique inclusivement. L'analyse de la durée de la saison pollinique permettra d'estimer la longueur de la saison pollinique d'une année à l'autre.

- Valeur maximale de la saison (exprimée en grains de pollen/m³)

La valeur maximale de la saison correspond à la concentration quotidienne de pollen la plus élevée durant la saison.

- Date de la valeur maximale de la saison (exprimée en date julienne)

La date maximale de la saison est la date où figure la plus haute concentration quotidienne de pollen, autrement dit, la date de la valeur maximale. Ces deux derniers paramètres peuvent dépendre de l'utilisation de données brutes ou lissées. Cet aspect sera traité plus en détail dans l'article 1.

- Concentration totale de pollen atmosphérique de la saison (index saisonnier de pollen)

La concentration de pollen atmosphérique totale de la saison est la quantité totale de grains de pollen enregistrés entre le début et la fin de la saison pollinique inclusivement. L'analyse de ce paramètre permettra d'apprécier l'intensité pollinique de la saison d'une année à l'autre.

2.3 Données météorologiques

2.3.1 Collecte des données et choix des variables

Les données météorologiques de Montréal proviennent d'Environnement Canada et correspondent à l'une des trois fréquences d'échantillonnage de base pour la collecte des données climatiques : la récolte quotidienne. La station climatique de Montréal est localisée à l'aéroport international Pierre Elliot Trudeau⁸ (anciennement appelé Dorval), à 15,75 km de la station pollinique.

Comme les données polliniques standards sont récoltées à 15 mètres du sol afin d'obtenir un nuage pollinique homogène, cette localisation ne peut permettre l'obtention de données météorologiques standard : c'est pourquoi toutes les études aérobiologiques utilisent les données météorologiques provenant de stations nationales. Par ailleurs, Comtois et Gagnon (1988) ont démontré que les stations aérobiologiques standards sont représentatives d'une aire d'au moins 250 km². L'important est donc d'avoir les deux stations d'enregistrement (aérobiologique et météorologique) dans cette même aire.

L'accès aux données climatiques a été possible en ligne⁹. Les variables météorologiques sont des données quotidiennes. Il a été initialement prévu d'utiliser toutes les données météorologiques accessibles sur le site d'Environnement Canada, à

⁸ Latitude : 45° 28' N ; longitude : 73° 45' O ; altitude : 35,70m

⁹ http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/Welcome_f.html (page consultée en janvier 2004)

savoir : les températures maximum, minimum et moyennes, les précipitations, l'humidité relative maximale et minimale et le vent. Cependant, trop de données manquantes étaient répertoriées pour les variables humidité relative et vent, ce qui a valu de les éliminer de notre étude.

2.3.2 Définition des variables

Les variables météorologiques retenues sont définies par Environnement Canada comme suit :

- Températures quotidiennes (en degrés Celsius (°C))
 - La température maximale est observée en degrés Celsius à la station pour le jour donné ;
 - La température minimale est observée en degrés Celsius à la station pour le jour donné ;
 - Enfin, la température moyenne est la moyenne de la température maximale et de la température minimale pendant le jour donné.

- Pluies quotidiennes (en millimètres (mm))

La pluie est la hauteur totale de pluie ou des précipitations, sous forme liquide, comme la pluie, la bruine, la pluie verglaçante et la grêle, observée pendant le jour donné.

Afin d'étudier les variations annuelles, les moyennes des températures maximales, minimales et moyennes annuelles ont été calculées à partir des données quotidiennes. Les précipitations annuelles correspondent à la somme des précipitations à chaque année. Les saisons météorologiques ont également été définies et correspondent aux moyennes des températures (maximum, minimum et moyennes) et aux précipitations totales durant une saison pollinique donnée.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

3.1 Article 1

Submitted in October, 2004 to *Aerobiologia, the International Journal of Aerobiology*

TRENDS IN AEROBIOLOGY: THE METHODOLOGICAL FACTOR.

C. Bapikée & P. Comtois

Department of Geography, University of Montreal, Montreal, Canada.

Key words: methodology, parameters, pollen season, smoothing data, aerobiology.

Abstract

Phenology, and its most common manifestation, airborne pollen, is one of the most sensitive biological element to global change because it is in constant equilibrium with atmospheric physical conditions. Therefore, the statistical analysis of multi-annual trends of aeropalynological parameters (for example the beginning or the end of a pollen season) is becoming more frequent. However, pollen curves (i.e. time related pollen profiles) are complex structures and any multi-annual trends will depend on which parameters are extracted from them and positioned on a time-series. Different methods are used to define parameters of pollen curves, and therefore of pollen seasons. In this study, the effects of the methodological factor in the determination of the multi-annual trend of six parameters of pollen seasons of five different taxa (maple (*Acer*), birch (*Betula*) and oak (*Quercus*) for trees, grasses (*Gramineae*) for herbs, and ragweed (*Ambrosia*) for weeds) for the period 1985 to 1997 for the Montreal region are observed. The selected

parameters are the beginning of the pollen season, the end of the pollen season, the length of the pollen season, the annual pollen count, the peak-value and the peak-date. Four previously defined thresholds (D1: 5%-95% of the annual total; D2: 2.5%-97.5% of the annual total; D3: 3 pollen/m³-2 pollen/m³; D4: the inflexion points of the cumulative annual sum) have been chosen to characterize the beginning and the end of the pollen season. The methodological differences for each taxa have been analyzed as well as the yearly curves and the trend lines. Our results show that D1, D2 and D4 methods present the same trend for the onset of the season between 1985 and 1997. However, D3 reveals a different trend: the pollen season begins earlier and interannual variations are more pronounced. The same observation can be made for the end of the season which is delayed when using the D3 method. The difference between the curves representing the length of each season was also significant when using the D3 method: this season can be up to seven times longer when compared with other thresholds. Finally, our results show that the total pollen counts are similar each year no matter which of the four methods is used. Thus, since, in most cases, pollen curves are quite regular in appearance, using any percentage (method D1 or D2) or inflexion points (method D4) give similar values. However, since the yearly amplitude of pollen count is quite variable, fixed thresholds (in pollen/m³) (method D3) are inapplicable for this parameter. Smoothing the data, using moving averages over two or three days, showed a tendency which is more or less comparable to the raw unsmoothed data. Averages smoothed over more than three days distort the main trend and the peak-values and peak-dates are no longer statistically significant.

1. Introduction

Earth's temperature has increased since the late 19th century and is warmer than it was before the start of the last industrial revolution (Ford, 1982). According to Villeneuve and Richard (2001), the burning of fossil fuels like coal, oil and gas has amplified the amount of greenhouse gases in the atmosphere and modified weather parameters such as temperature; moreover, the increase of the global temperature generates changes in the amount and pattern of rain and snow, in the frequency and severity of storms, in the length of growing seasons, and in sea level. Plant communities and individual species

living in natural environments will be affected; it is known that every aspect of plant growth depends on climate, thus natural flora is very sensitive to climate change (Ford, 1982). Not only are production and development of pollen closely linked to meteorological factors but a strong relationship also exists between the movement and the dispersion of airborne pollen and weather parameters (Laaidi, 2001, Barnes *et al.*, 2001, Emberlin and Norris-Hill, 1996, Galán *et al.*, 2000, Glassheim, *et al.*, 1995). The study of pollen seasons and fluctuations in climate becomes interesting because airborne pollen is affected in both its emission and dispersal phases by weather parameters.

Time-series analysis may be carried out in such a way that changes in the spatial and temporal variations of pollen seasons can be detected. Pollen curves are mathematically too complex to be directly included in trend analyses. Accordingly, pollen parameters such as the onset of the season, the end of the season or the length of the season can be used to represent the most significant phases of pollen seasons. Many definitions, and thus, distinctive methods of analysis have been proposed for each of the parameters. Therefore, the selection of a definition of a parameter is an important aspect of any aeropalynological research because both the results and their interpretation will depend on the choice of the method. This paper focuses on the first step of this research protocol which consists of clarifying the methodology to be used in further research. The aims of this study are firstly to observe the consequences of changing the definition of pollen parameters on the characteristics of the pollen season and secondly, to examine if smoothing techniques on the yearly curves of annual pollen counts affect peak-values and peak-dates.

The study was conducted in Montreal (Quebec, Canada) for the 1985-1997 period. Montreal is characterized by a temperate climate with long and cold winters and short and warm summers. The yearly mean temperature is 6.1°C and the yearly mean precipitation is 966.8 mm including 214.2 cm of snow (Environment Canada¹⁰). It is an

¹⁰

http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/results_f.html?Province=ALL&StationName=montreal&SearchType=BeginsWith&LocateBy=Province&Proximity=25&ProximityFrom=City&StationN

ideal location for phenological studies. Hardwood, pine and hemlock are the most characteristic taxa of Montreal's phytogeographical province (Braun, 1950) and Montreal's island is characterized as a *Caryeto-Aceretum Caryetosum* (Grandtner, 1966). Aero-bio-geographically, ragweed (*Ambrosia*) is the most abundant airborne pollen in the area (Comtois and Gagnon, 1988).

2. Material and methods

Pollen sampling was performed using a seven-day Burkard trap during the 1985-1997 interval. The sampler is located on the roof (15 m above ground) of the Department of the Geography building at the Université de Montréal (Montréal, Québec, Canada). Data were collected each week on a 7-day acrylic tape. Every seven days, the tape was cut in 24-hour cycles and each portion was examined at 400x magnification with a Leitz Laborlux optical microscope to facilitate pollen count. The four longitudinal sweeps methods is then used to count the pollen grains (Mandrioli *et al.*, 1998).

Five taxa were analyzed: maple (*Acer* spp.), birch (*Betula* spp.) and oak (*Quercus* spp.) for trees, grasses (*Gramineae*) for herbs, and ragweed (*Ambrosia*) for weeds. They correspond to the most allergenic pollen types of the area and their study therefore represents an important aspect of the adaptation to climate variability, especially those related to public health. The pollen season was characterized by six parameters: the onset of the season (julian date), the end of the season (julian date), the length of the season (number of days), the annual pollen count (pollen index), the peak-value (pollen grains/m³) and the peak-date (julian date). Four definitions have been chosen to characterize the beginning and the end of the pollen season. The first one (D1) (Nilsson and Persson, 1981) defines the beginning of the season as the date for which the accumulated sum reaches 5% of the annual total; the end of the season is therefore when the sum reaches 95%. The second definition (D2) used by Rasmussen (2002) uses similar criteria but thresholds are fixed to 2.5% and 97.5% respectively. The criteria developed by Teranishi *et al.* (2000), used for pollen deposition density (in grains/cm²),

umber=&IDType=MSC&CityName=&ParkName=&LatitudeDegrees=&LatitudeMinutes=&LongitudeDegrees=&LongitudeMinutes=&NormalsClass=A&SelNormals=&StnId=5415& (June, 2005).

was adapted: the first day of the season was defined as the day for which 3 or more pollen grains/m³ were counted for the first time of the year; or the first day that 1 grain/m³ was counted for at least 3 consecutive days. The end of the season was the last day on which 2 or less pollen grains/m³ was counted (D3). The last criteria (D4) considers the first and the last day of the season as the two inflexion points of the sigmoid cumulative annual pollen sum (Pathirane, 1975). As for the length of the season, it was evidently the number of days between the first and the last day of the pollen season. The peak-date was the date with the highest daily concentration (peak-value), and finally, the total pollen count corresponds to the sum of the daily pollen grains/m³ between the beginning and the end of the season. Yearly curves and trend lines were observed in order to compare the differences between the methods.

Curve smoothing using moving averages is a common procedure applied for purpose of pollen forecasting (Comtois and Sherknies, 1991), thus, daily values were averaged over two, three, four and five days in order to observe the effects of smoothing the yearly pollen curves on peak-values and peak-dates. The criterion of Main Pollination Period (MPP) taken into account to represent the pollen curve here is 90% of the annual total pollen concentration, eliminating the initial 5% and the final 5% (Nilsson and Persson, 1981).

3. Results

3.1. Estimation of the beginning of the season

The estimation of the beginnings of the season is shown in Figures 1 to 5. When the beginning of the season is defined with the methods D1, D2 and D4, it starts at more or less the same period each year. However, the results are different when using the method D3, for which the season starts earlier; for example, in Figure 5, the first day of *Ambrosia* in 1988 starts about 115 days earlier than in 1985. Also, the beginning of the season of *Betula* in 1994 (Figure 2) starts about 28 days earlier than in 1985. The curves present different shapes and an important dissimilitude has been observed between the curves D3

and the other ones. For instance, the yearly trend of *Ambrosia* represented by the method D3 is more accentuated than the others (Figure 5). Not only are the yearly fluctuations different, but also, according to the method, the peak-years do not occur the same year. For example, in Figure 3, *Quercus* has its peak-year in 1994 with the method D3, while the methods D1, D2 and D4 show 1994 as being a weak pollination year. Also, for *Acer* in Figure 1, the peak-years in 1988 and 1995 represented with the method D4 contrast with the results represented with the methods D1, D2 and D4. The trend lines also vary with the definition of the parameter (trend lines not shown). In Figure 3, the trend line representing the D3 curve is steeper than the trend line corresponding to the D1 definition. The difference is even greater with *Ambrosia* (Figure 5). Finally, for *Betula*, the trend line representing the D3 method is heading in an opposite direction to the other ones (Figure 2).

3.2. Estimation of the end of the season

As was the case with the beginning of the season, the methodological factors also influence the estimation of the end of the season. The D1, D2 and D4 methods reveal that the pollen season is estimated to end at the same time of the year for each taxa. For the criteria D3, the season end is delayed: in 1991, the season of *Acer* in Figure 6 ends about 125 days later. The difference between the curves is more visible in Figures 9 (*Gramineae*) and 10 (*Ambrosia*) where fluctuations are greater. In Figures 6 (*Acer*), 7 (*Betula*) and 8 (*Quercus*), the curves representing the criteria D3 look more irregular. Furthermore, peaks of each taxa do not necessarily appear the same year on each graph. For example in Figure 6 (*Acer*), but exclusively according to the D3 criteria, 1988 and 1995 are peak-years. The trend lines also have different inclination (trend lines not shown). For *Gramineae* (Figure 9), the steepest trend line belongs to the method D4. In Figures 7 (*Betula*), 8 (*Quercus*) and 10 (*Ambrosia*), the slopes have the same overall trend, but in Figures 6 (*Betula*) and 9 (*Gramineae*), their angle is quite variable.

3.3. Estimation of the length of the season

The length of the season varies with its definition (Figures 11 to 15). All the curves using D3 method show longer seasons and more variability between the years: for example, in Fig. 11 (*Acer*), the length of the season in 1991 is estimated at 164 days; when using the D1, D2 and D4 methods, the length of the same season at the same year is approximately 40 days. Similar results were observed for *Ambrosia* in 1988 and 1994 (Figure 15). In short, with the D3 method, we observe greater interannual variations in the length of the seasons and differences in the year at which the peaks occur. In Figures 11 (*Acer*) and Figure 15 (*Ambrosia*), the trend lines (not shown) corresponding to the criteria D3 are steeper: in the first chart, *Acer* has an uptrend line whereas in the second, *Ambrosia* displays a downtrend line. It has also been noticed that, for *Ambrosia*, the lines are heading in opposite directions (not on chart).

3.4. Estimation of the annual pollen count

For the estimation of the pollen count presented in Figure 16 to 20, no significant differences have been noticed between the four methods. The yearly curves and trend lines have the same shape and orientation. Annual pollen counts are therefore only weakly affected by longer pollen seasons (like the ones obtained with the method D3) since maximum values (pollen index) are included with any of the criteria.

3.5. Effect of the moving averages

In general, all curves smoothed over two (2 per. Mov. Avg.) or three (3 per. Mov. Avg.) days look similar to the raw unsmoothed data, as shown for example in Figure 21. We observed that the peak values decrease as the curves are smoothed. For example, for *Acer* in 1985 (Figure 22), the peak-value of 100 p/m^3 reaches about 50 p/m^3 when data is average over two and three days.

Examples of data averaged over four (4 per. Mov. Avg.) or five (5 per. Mov. Avg.) days are represented in Figures 23 and 24. Not only the peak-values of the annual pollen count of *Gramineae* decrease when smoothed, we also observe that, contrary to the data averaged over two and three day (Figures not shown), the peak-dates can appear later. For example, in Figure 23, the raw unsmoothed data of *Gramineae* peaks at day 179 with a peak-value of 106 p/m³. When the data is averaged over four and five days, the peak-value in 1989 decreases to approximately 70 p/m³ and the peak-date shifts to day 189 (10 days later).

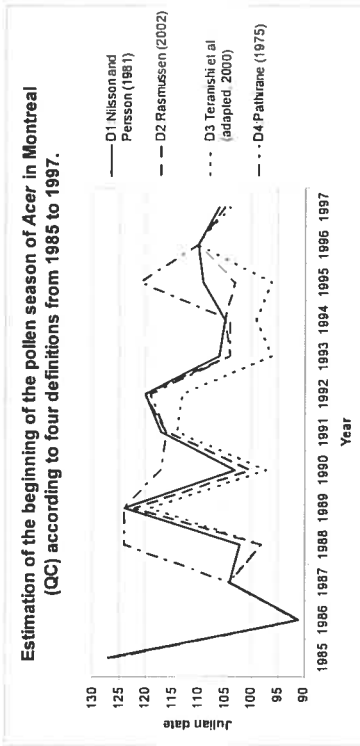


Fig. 1. Estimation of the beginning of the season of *Acer*

Estimation of the beginning of the pollen season of *Quercus* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

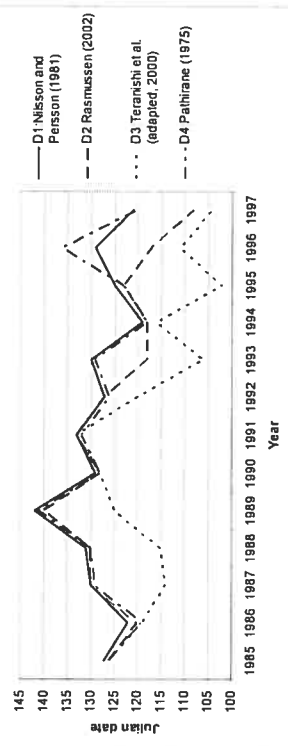


Fig. 3. Estimation of the beginning of the season of *Quercus*

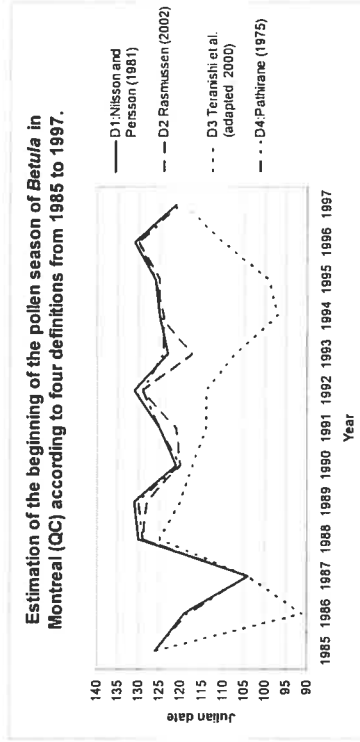


Fig. 2. Estimation of the beginning of the season of *Betula*

Estimation of the beginning of the pollen season of *Gramineae* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

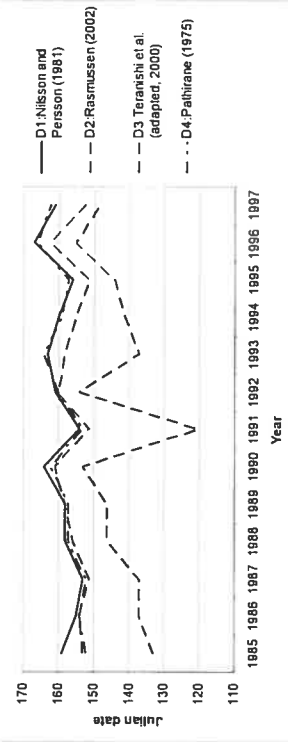


Fig. 4. Estimation of the beginning of the season of *Gramineae*

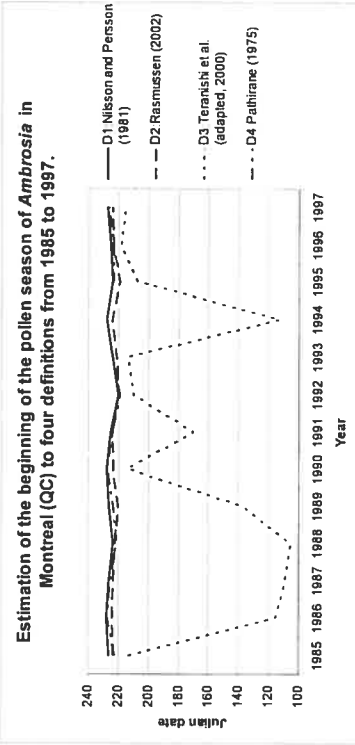


Fig. 5. Estimation of the beginning of the season of *Ambrosia*

Estimation of the end of the pollen season of *Acer* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

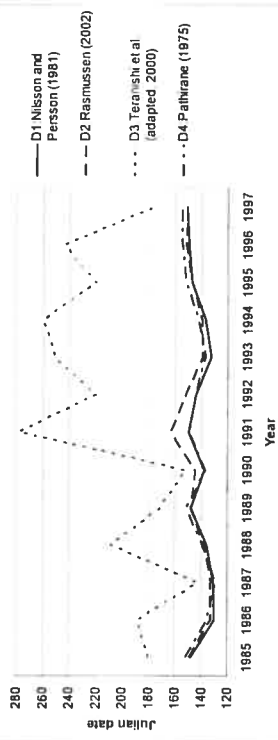


Fig. 6. Estimation of the end of the season of *Acer*

Estimation of the end of the pollen season of *Quercus* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

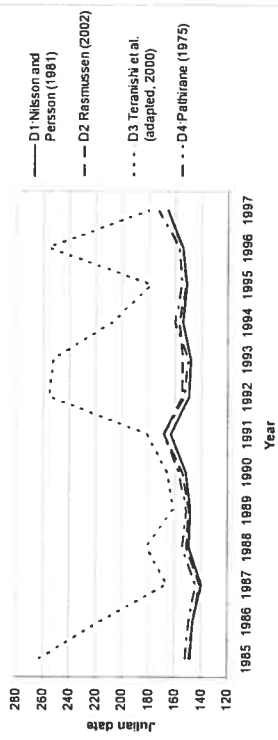


Fig. 8. Estimation of the end of the season of *Quercus*

Estimation of the end of the pollen season of *Betula* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

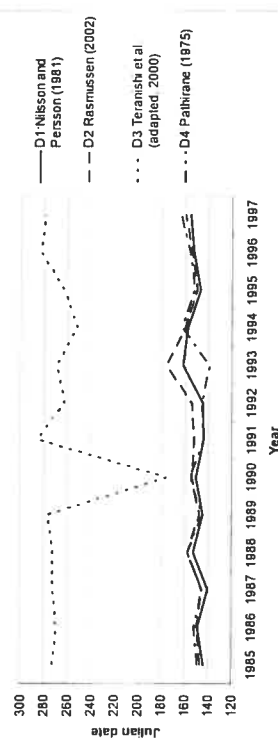


Fig. 7. Estimation of the end of the season of *Betula*

Estimation of the end of the pollen season of *Gramineae* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

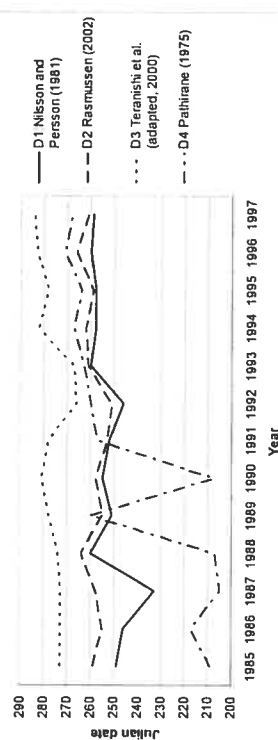


Fig. 9. Estimation of the end of the season of *Gramineae*

Estimation of the end of the pollen season of *Ambrosia* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

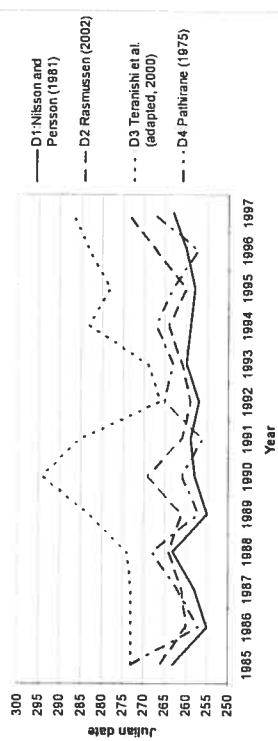


Fig. 10. Estimation of the end of the season of *Ambrosia*

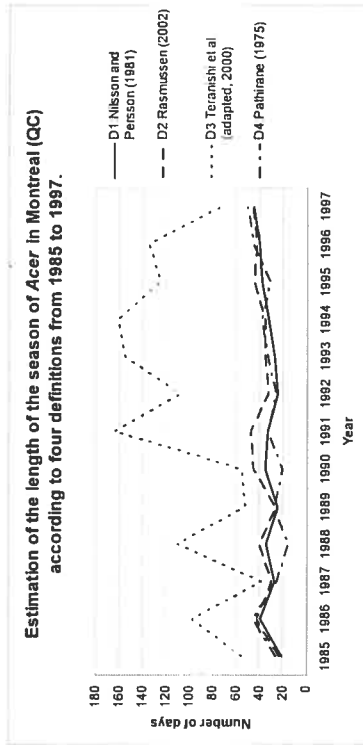


Fig. 11. Estimation of the length of the season of *Acer*

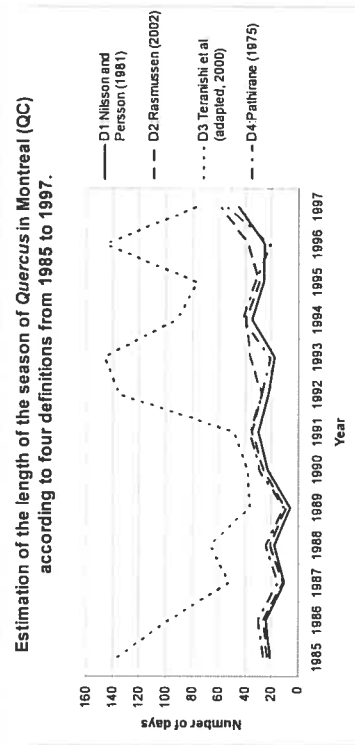


Fig. 13. Estimation of the length of the season of *Quercus*

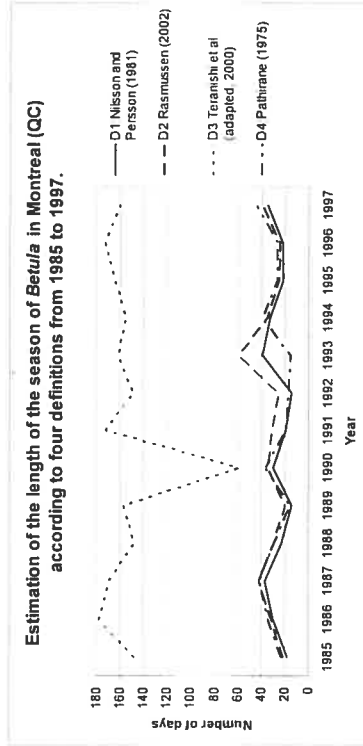


Fig. 12. Estimation of the length of the season of *Betula*

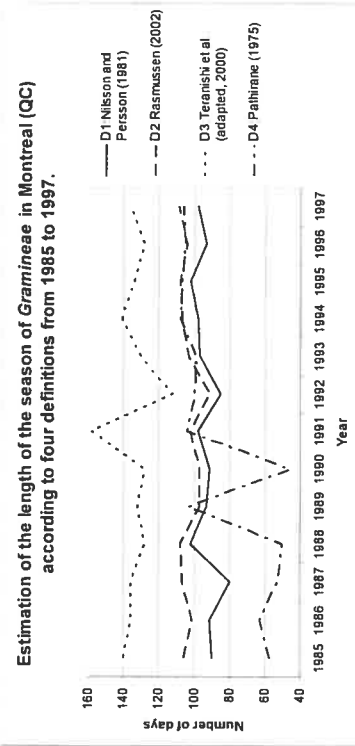


Fig. 14. Estimation of the length of the season of *Gramineae*

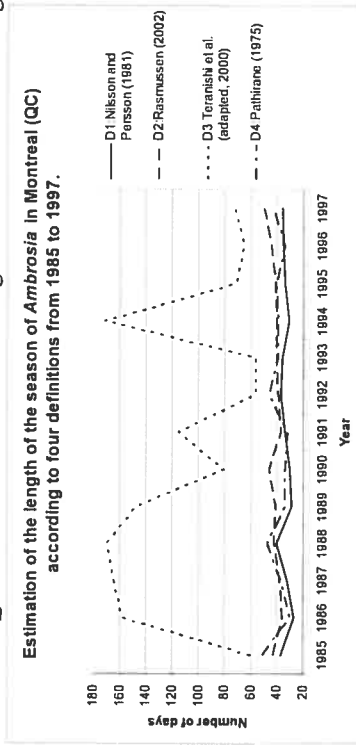


Fig. 15. Estimation of the length of the season of *Ambrosia*

Estimation of the annual pollen count of *Acer* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

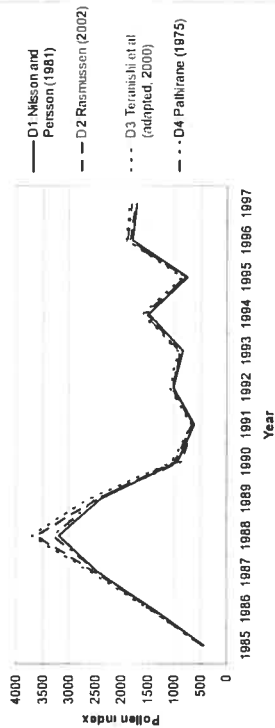


Fig. 16. Estimation of the annual pollen count of *Acer*.
Estimation of the annual pollen count of *Quercus* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

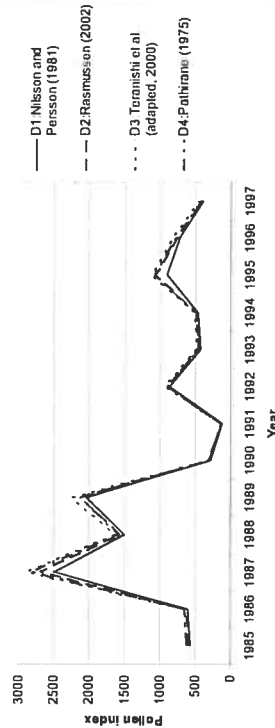


Fig. 18. Estimation of the annual pollen count of *Quercus*

Estimation of the annual pollen count of *Betula* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

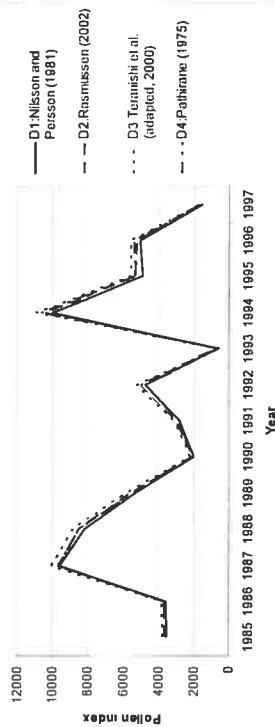


Fig. 17. Estimation of the annual pollen count of *Betula*.
Estimation of the annual pollen count of *Gramineae* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

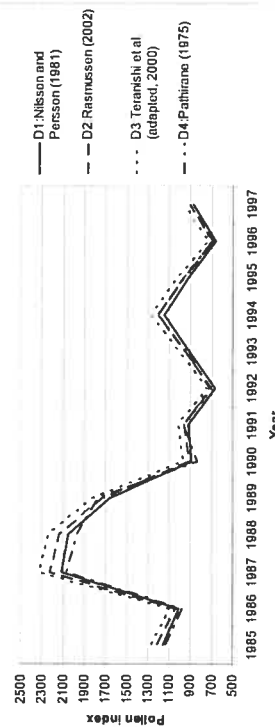


Fig. 19. Estimation of the annual pollen count of *Gramineae*

Estimation of the annual pollen count of *Ambrosia* in Montreal (QC) according to four definitions from 1985 to 1997.

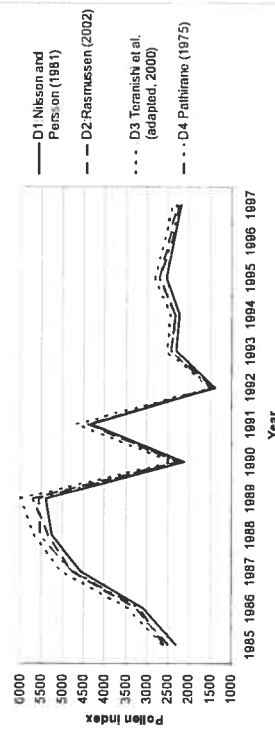


Fig. 20. Estimation of the annual pollen count of *Ambrosia*

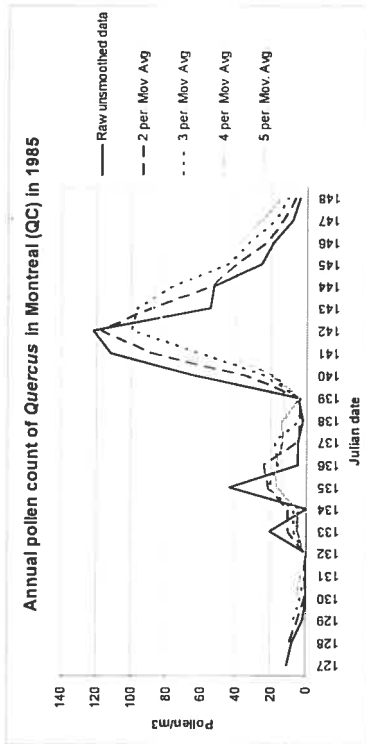


Fig. 21. Averaged data of the annual pollen count of *Quercus* in 1985

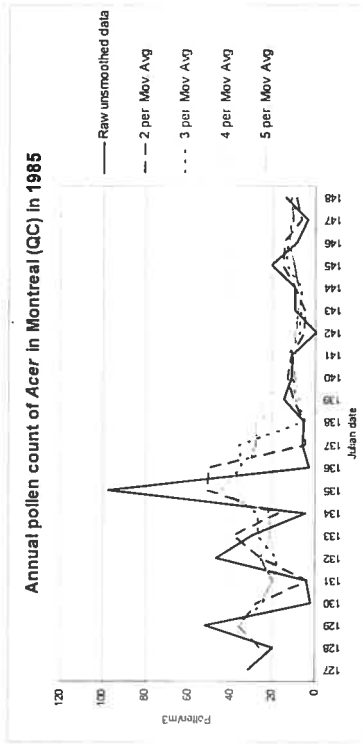


Fig. 22. Averaged data of the annual pollen count of *Acer* in 1985

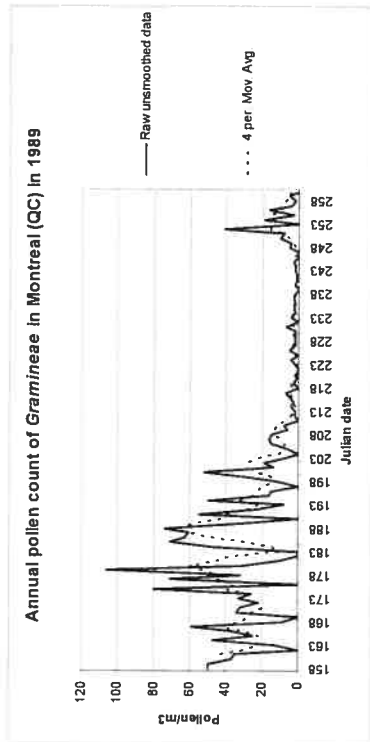


Fig. 23. Annual pollen count of *Gramineae* averaged over 4 days in 1989

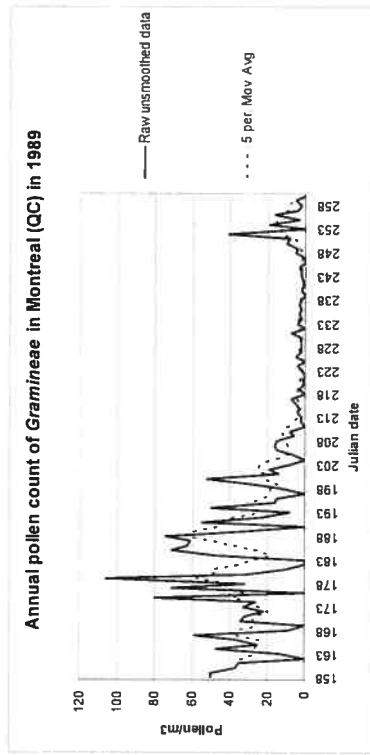


Fig. 24. Annual pollen count of *Gramineae* averaged over 5 days in 1989

4. Discussion

This study demonstrates that the definition of phenological parameters influence the characteristics of the pollen season. Results showed that the yearly curves and the trend lines vary along with the threshold criteria, meaning that according to the definition, we obtain different results. However, 3 methods display similar results: the 5% (D1), the 2.5% (D2) and the inflexion points criteria (D4). The one corresponding to fixed airborne concentrations (D3) reveal different trends because the definition considers only a smaller portion of the pollen season to determinate the first and the last day of the season. Consequently, the estimation of the parameters of the pollen seasons is often biased. The main advantage of the D3 method and its “raison d’être” is that it could be applied in real time, in forecasting algorithms, which is not the case for the other criteria. Indeed, all the other methodologies are based on cumulative parameters which need a complete pollen season before being used. We believe that specific threshold criteria still have a promising future, but they definitely need to be updated (see Riva *et al.*, 2002).

Time series regression lines help to define the general trend of the different pollen season parameters. They are used here to observe the shift of the beginning or the end of the season and also the length and the annual pollen count from 1985 to 1997. The steepest the trend line is, the biggest the variation over time. For example, for the beginning of the season of *Quercus*, the trend line using D3 indicates that in 1997, the season started 18 days earlier than in 1985. Conversely, the one corresponding to D1 suggest that the season was advanced by only 5 days in 1997. This means that the shift from 1985 to 1997 is more or less pronounced according to the definition of the parameter used.

The beginning and the end of the season are essential to determine the length of the season. Therefore, the earlier the season starts (and/or the later it ends), the longer it lasts. For instance, for D1, the season includes 90% of the total catch for the year while for D2 it corresponds to 95% of the total annual pollen. Since the definition of D3 refers to a smaller threshold (3 p/m^3 - 2 p/m^3 for the beginning/end of the pollen season), the corresponding seasons are longer. Thus, the length of the season varies with the estimation of the beginning and the end of the season.

Even if we have demonstrated that the estimation of the onset and ending parameters is influenced by the method, the methodological factor does not have an important effect on the estimation of the annual pollen counts because they remain relatively unchanged. As for the estimation of the peak-year and the peak-value, these are definitely not affected by the definition used. They are “distribution free” parameters and could even be seen as non parametric variables. They should therefore be the choice parameters for comparative trends studies. Moreover, they are the parameters mostly related to the health impact of airborne pollen since allergenic people for instance will be more sensitive to peak-values and peak-dates, that is, when the concentration of airborne pollen is greater. So, contrary to the phenological parameters (onset and ending), adaptation studies of fluctuations of climate and impact on airborne pollen will use amplitude parameters (peak-value, annual total) that are mostly free of any methodological factors other than taxa selection.

Data averaged over two or three days showed a tendency which is more or less comparable to the raw unsmoothed data. When the annual total pollen count is averaged over four or five days, annual variations are still noticeable but there is a gap between the initial peak-value which becomes lower and the initial peak-date which appears later in the pollen season. In order to pinpoint errors to the trend, low (≤ 3) moving averages should be used because, under these circumstances, curves keep their initial shape and little information is lost from the initial peak-values and peak-dates. On the contrary, to have a better estimate of the trend, high (> 3) moving averages should be preferred because then, the general view of the shape of the curve becomes the highlighted point.

Conclusion

The definition of the parameters of a pollen season should be carefully selected because it will greatly influence any trend interpretation. It is in fact surprising that many multi-annual trends have been published without considering the methodological factors. Since, in most cases, pollen curves are quite regular in shape, using any percentage or inflexion points give similar values. However, since yearly amplitude is quite variable,

fixed thresholds (in pollen/m³) are inapplicable. These still have a development potential, since they are the only ones that can be used in real time; indeed, the advantage of using fixed thresholds remains in the fact that the beginning of the seasons can be determined without consideration of the end of the pollination period. But they definitely need to be re-evaluated, and most probably upward, to higher thresholds. Those actually published take too much into consideration the Pollen Presence Period (PPP) instead of the Main Pollination Period (MPP) (Comtois and Sherknie, 1991).

Also, distribution free parameters such as peak-dates, peak-values and annual totals should be the choice parameters for comparative trend studies such as the ones focused on adaptation to climate variations, because they are free of influence most of methodological factors and are the most significant in studies relating to health issues. However, high moving average (>3) should not be used to observe peak-values and peak-dates of annual pollen curves because initial information is lost when data is averaged over more than three days.

Considering the above arguments, we suggest that the following criteria are used for multi-annual trends studies related to allergenic pollen seasons and fluctuations in climate in relation with health: in order to include the first allergenic pollen grains emitted, we decide not to eliminate more than 5% of the annual total pollen count and to take into account 95 % of the annual total pollen concentration. Thus, we propose the beginning of the season (julian date) to be the date on which the accumulated pollen sum reaches 2.5% of the annual total and the end of the season (julian date) to be the date when this accumulated sum reaches 97.5%. As for smoothing techniques, we recommend not to use them in such studies since they affect the peak-values and the peak-dates.

References

- Alcázar, P., and P. Comtois. 2000. « The influence of sampler height and orientation on airborne *Ambrosia* pollen counts in Montreal ». *Grana*, vol. 39, n. 6, p. 303-307.
- Barnes, C., F. Pacheco, J. Landuyt, F. Hu and J. Portnoy. 2001. « The effect of temperature, relative humidity and rainfall on airborne ragweed pollen concentration ». *Aerobiologia-International Journal of Aerobiology*, vol. 17, n. 1, p. 61-68.
- Braun, E. L. 1950. *Deciduous forest of Eastern North America*. The Free Press, New York, 596p.
- Comtois, P., and S. Boucher. 1996. « Phenology and aerobiology of short ragweed (*ambrosia artemisiifolia*) pollen ». Chap. In: *Aerobiology*. Lewis Publishers New York, p.17-26.
- Comtois P. and L. Gagnon. 1988. « Concentration pollinique et fréquence des symptômes de pollinose : une méthode pour déterminer les seuils cliniques ». *Revue Française d'Allergologie*, vol. 28, p. 279-286.
- Comtois P. and D. Sherknies. 1991. « Pollen curves typology ». *Grana*, vol. 30, p. 184-189.
- Emberlin, J. C., and J. Norris-Hill. 1996. « The influence of wind speed on the ambient concentrations of pollen from *Gramineae*, *Platanus*, and *Betula* in the air of London, England ». Chap. In: *Aerobiology*. Lewis Publishers, New York, p.27-38.
- Ford, M. J. 1982. *The changing climate: Responses of the natural flora and fauna*. George Allen and Unwin, London, 190 p.
- Galán, C., P. Carinaños, H. García-Mozo, P. Alcázar and E. Domínguez-Vilches. 2000. « Meteorological factors affecting daily urticaceae pollen counts in southwest Spain ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 43, n. 4, p. 191-195.
- Glassheim, J. W., R. A. Ledoux, T. R. Vaughan, M. A. Damiano, D. L. Goodman, H. S. Nelson and R. W. Weber. 1995. « Analysis of meteorological variables and seasonal aeroallergen pollen counts in Denver, Colorado ». *Annals of Allergy, Asthma, & Immunology*, vol. 75, p. 149-156.
- Grantner, M. 1966. *La végétation forestière du Québec méridional*. Presses de l'Université Laval. Québec, 216 p.

- Jato, V., M. J. Aira, M. I. Iglésias, P. Alcázar, P. Cervigón, D. Fernández, M. Recio, L. Ruíz and L. Sbai. 1999. « Aeropalyngology of Birch in Spain ». *Polen*, vol. 10, p. 37-47.
- Laaidi, M. 2001. « Forecasting the start of the pollen season of *Poaceae*: evaluation of some methods based on meteorological factors ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, n. 1, p. 1-7.
- Lejoly-Gabriel, M. 1978. « Recherches écologiques sur la pluie pollinique en Belgique ». *Acta Geographica Lovaniensia*, vol. 13, p. 1-278.
- Newnham, R. M. 1999. « Monitoring biogeographical response to climate change: The potential role of aeropalyngology ». *Aerobiologia*, vol 15, p. 87-94.
- Nilsson, S., and S. Persson. 1981. « Tree pollen spectra in the Stockholm region ». *Grana*, vol. 20, p. 179-182.
- Pathirane, L. 1975. « Graphical determination of the main pollen season ». *Pollen et Spores*, vol. 17, p. 609-610.
- Rasmussen, A. 2002. « The effects of climate change on the birch pollen season in Denmark ». *Aerobiologia*, vol 18, p. 253-265.
- Riva, M., P. Comtois and T. Ly. 2002. « Pollen counts and risk assessment ». 7th International Congress on Aerobiology, Montebello (Qc.).
- Teranishi, H., Y. Kenda, T. Katoh, M. Kasuya, E. Oura and H. Taira. 2000. « Possible role of climate change in the pollen scatters of Japanese cedar *Cryptomeria japonica* in Japan ». *Climate Research*, vol. 14, p. 65-70.
- Villeneuve, C., and F. Richard. 2001. *Vivre les changements climatiques : L'effet de serre expliqué*. Éditions MultiMondes, Sainte-Foy (Qué.), 274 p.

3.2 Article 2

To be submitted in August, 2005 to *Global Environmental Change*

**CLIMATE VARIATIONS AND POLLEN CONCENTRATION IN MONTREAL
FROM 1985 TO 1998.**

C. Bapikée & P. Comtois

Department of Geography, University of Montreal, Montreal, Canada.

Key words: climate variability, allergy, pollen season, adaptation, health, aerobiology.

Abstract

Climate change and the increase in the prevalence of pollinosis, commonly called hay fever, have received a lot of attention in recent years. Changes in climate and fluctuations in climate are likely to have an impact on health. Moreover, a suspected increase of airborne pollen could probably affect a large proportion of the population. For these reasons, the general belief is supposedly that interannual climate variations may be responsible for the current increasing incidence of allergies. The relation between daily airborne pollen and weather is well known and therefore, it is assumed that future atmospheric pollen concentration can be forecasted based on climate change forecasts. However, little work has been done on the effects of recent climate variations on allergenic pollen abundance. In order to examine the relationship between the concentration of airborne pollen and interannual climatic variations, we conducted a temporal study in Montreal (Quebec, Canada) from 1985 to 1998. Our study focuses on the effects of climate variability on pollen season parameters (the beginning, the end, the length, the annual pollen count, the peak-value and the peak-date of the pollen season). We found that for all of the taxa, their pollen seasons are longer, they begin earlier

(except for *Betula*) and end later, but we observed a diminution in their peak-values. We also found that taxa behave very differently when it comes to the annual pollen count; for most of them the amount of pollen has decreased. Also, fluctuations in climate are more perceptible in shorter periods of time like pollen seasons, as compared to whole years and that seasonal precipitation has a more marked effect on the airborne pollen from trees while annual temperatures have more influence on the airborne pollen from grasses. We believe that the net effect of longer pollen seasons but weaker peak and lower seasonal amplitude will be decreasing allergies symptoms.

1. Introduction

According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (McCarthy *et al.*, 2001), both natural systems (e.g. glaciers, boreal and tropical forests, polar and alpine ecosystems, prairie wetlands) and human systems (e.g. agriculture, forestry, human health) are vulnerable and sensitive to climate change. Impacts on human systems, particularly human health are probably the most difficult to forecast. Events such as climate extremes (heat waves, storms, floods, cyclones) would supposedly increase in frequency; the extension of certain vector-borne diseases (e.g. malaria or dengue) to higher latitudes and altitudes are expected to cause serious health injuries (McCarthy *et al.*, 2001). These catastrophic events receive a lot of attention when it comes to the study of the impacts of global change on human health. However, the milder effects of aeroallergens abundance have been neglected despite the fact that there is published evidence that climate change has already had, and will have an impact on aeroallergens (Beggs, 2004). A suspected increase of airborne pollen would probably affect a large proportion of the population, since about 20% of the population is sensitive to airborne uneder our latitude and in our hemisphere. The relation between airborne pollen and weather is well known and therefore, it is assumed that future atmospheric pollen concentration can be forecasted based essentially on climate change parameters. Yet, little work has been done on the potential effects of climate variations on allergenic pollen abundance (Wayne *et al.*, 2002). Adaptation to the suspected increased of airborne pollen caused by the current variations in climate can significantly reduce

damage. The challenge for adaptation research is to find ways of improving adaptation and reducing vulnerability to climatic change (Burton, 1997).

Today, the increasing prevalence of allergies, such as pollinosis¹¹ as well as climate change have become important challenges in our societies (Clot, 2003; Van Vliet *et al.*, 2002). The fact that airborne pollen is influenced by meteorological factors (Laaidi, 2001) may explain why the general view is to suppose that climate variability may be responsible for the increasing prevalence of allergies. According to Van Vliet *et al.* (2002), people who suffer from hay fever will have to face the advance of the start of the pollen season.

Climatic factors influence the productivity of plants (Ford, 1982). As a natural system, plants are very sensitive to climate and climatic variations and are the first group of living organisms on which the influence of climate has been clearly observed (Tromp, 1980). Dawson (1992) showed that past climate changes have had impacts on the behavior and reproduction of different species. More recent studies have shown that the current warming will induce plant migration and changes in the density and behavior of species (Terry *et al.*, 2003). Such changes are expected to be more significant at higher latitudes, where vegetation is more sensitive to temperature variations (Walker and Steffen, 1997; Moen *et al.*, 2004).

Climate change is also likely to cause changes in the concentration of aeroallergens (McCarthy *et al.*, 2001). It is important to understand that prior to anthesis (the moment at which anthers emit most of their pollen grains in the air), genetics or physiological factors influence pollen productivity. However, subsequent to anthesis, weather parameters influence the behavior of pollen because at this time, pollen grains have been emitted and they are passive organisms dispersed in the atmosphere (Comtois et Boucher, 1996). As part of the development of a plant, the start of flowering (which has been observed to begin earlier in many parts of the world), and thus pollen release, is

¹¹ Seasonal rhinitis resulting from an allergic reaction to pollen.

determined by climate variables, and more particularly by temperature (Van Vliet *et al.*, 2002). Rasmussen (2002) showed that the increase of temperature caused by global warming would influence the flowering of plants and the dispersion of airborne pollen. Galán *et al.* (2000) reported that the rise of temperatures, combined with a lack of precipitation, is followed by an earlier flowering season. Teranishi *et al.* (2000) also reported that global warming can cause an earlier beginning of the Japanese cedar pollen season: moreover, they noticed an increase in the total pollen count and a longer pollen season. As for rising carbon dioxide (CO₂) concentration, experiments have shown that it has a direct impact on pollen production and pollen concentration, which have been observed to increase significantly (Ziska *et al.*, 2000).

Aerobiological monitoring of airborne pollen has started after the First World War and since, the study of airborne pollen has markedly increased (Laaidi *et al.*, 1997). Nowadays, many research centers have accumulated a significant number of years of pollen sampling that allows us to visualize the effects of climatic variations on pollen emission and dispersion; this should lead to the determination of the role of climate change on the amount of pollen produced (Van Vliet *et al.*, 2002).

In order to examine the relationship between the concentration of airborne pollen and climate variations, we conducted a temporal study in Montreal (Quebec, Canada) from 1985 to 1998. Montreal is characterized by a temperate climate with long and cold winters and short and warm summers. The yearly mean temperature is 6.1°C (sampler located at the Pierre-Elliott Trudeau international airport formerly called Dorval international airport) and the yearly mean precipitation is 966.8 mm including 214.2 cm of snow (Environment Canada¹²). Hardwoods, pine and hemlock are the most characteristic taxa of Montreal's phytogeographical province (Braun, 1950) and the

¹²

http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/climate_normals/results_f.html?Province=ALL&StationName=montreal&SearchType=BeginsWith&LocateBy=Province&Proximity=25&ProximityFrom=City&StationNumber=&IDType=MSC&CityName=&ParkName=&LatitudeDegrees=&LatitudeMinutes=&LongitudeDegrees=&LongitudeMinutes=&NormalsClass=A&SelNormals=&StnId=5415& (June, 2005).

island of Montreal is characterized as a *Caryeto-Aceretum Caryetosum* (Grandtner, 1966). Aero-bio-geographically, ragweed (*Ambrosia* spp.) is the most abundant airborne pollen in the area (Comtois and Gagnon, 1988). Our study focuses on the effects of climate variability on pollen season parameters (the beginning, the end, the length, the annual pollen count, the peak-value and the peak-date of the pollen season).

2. Material and methods

The 1985-1998 period of study has been chosen according to the availability and the coherence of both meteorological and pollen data. Moreover, the interval include the decade of 1990 and in particular, the year of 1998, both considered to be the warmest since 1896 (Houghton *et al.*, 2001).

2.1. Pollen data

Pollen sampling was performed using a seven day Burkard volumetric pollen trap operating from April to October during the 1985-1998 interval. The sampler was located on the roof (15 m above ground) of the Department of Geography building at the University of Montréal (Montreal, QC, Canada). The trap draws 10 liters of air per minute through a 2x14mm orifice. Airborne particles are impacted on an adhesive Melinex tape that rotates 2mm every hour on a drum. Tapes are changed every week, they are then cut in 24 hours slices and they are analyzed at 400x magnification with a Leitz Laborlux optical microscope for pollen count and identification. The four longitudinal sweeps methods is then used to count the pollen grains (Mandrioli *et al.*, 1998).

Five taxa were analyzed: maple (*Acer* spp.), birch (*Betula* spp.) and oak (*Quercus* spp.) for trees, grasses (*Gramineae*) for herbs, and ragweed (*Ambrosia*) for weeds. They correspond to the most allergenic pollen types of the main pollen season of the year. The study of these taxa in a context of climate variability should therefore represent a way of improving adaptation to the suspected increased of airborne pollen caused by the current fluctuations in climate.

The pollen season can be characterized by six parameters: the onset of the season, the end of the season, the length of the season, the annual pollen count, the annual peak-value and the annual peak-date. In order to determine the beginning or the end of the pollen season, several methods were previously tried (Bapikée and Comtois, 2004); we found similar results when using percentages (5-95%, 2.5-97.5%) or inflexion points methods. Therefore, we decided to pick one of these three methods for this study. It is known that allergens from pollen grains are released when the grains are inhaled or contact the membranes of the eye (Laaidi *et al.*, 1997). In order to include the first allergenic pollen grains emitted, we decide not to eliminate more than 5% of the annual total pollen count and to take into account 95 % of the annual total pollen concentration. Thus, we have defined the beginning of the season (julian date) as the date on which the accumulated pollen sum reaches 2.5% of the annual total; the end of the season (julian date) is defined as the date when this accumulated sum reaches 97.5%. The length of the season (number of days) is the number of days between the first and the last day of the pollen season, as defined above. The peak-date (julian date) is the date with the highest daily concentration (peak-value in p/m^3), and finally, the total pollen count (pollen index) corresponds to the sum of the daily pollen counts (p/m^3) between the beginning and the end of the season.

2.2. Meteorological data

Meteorological data were extracted from Environnement Canada's official website¹³. The meteorological station is located at Pierre Elliot Trudeau international airport¹⁴ (formerly called Dorval International airport), 15.75 km from the pollen sample station. Comtois and Gagnon (1998) showed that standard aerobiological stations are representative of an area of at least 250 km^2 . The most important is thus to have both, the meteorological and the aerobiological station located within this area.

¹³ http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca/Welcome_f.html (January, 2004)

¹⁴ Latitude : 45° 28' N ; longitude : 73° 45' O ; altitude : 35,70m

Daily meteorological data that were used for the 14 year period (1985-1998) include: maximum, minimum and mean temperatures (°C) as well as precipitations (mm). In order to study annual variations, daily temperatures were averaged every year to obtain yearly means of the maximum, minimum and mean temperatures. Yearly total precipitations were the sum of daily precipitation for each year. Seasonal meteorological seasons were also studied in order to determinate which of the annual or seasonal meteorological data affect the most airborne pollen. The characteristics of a meteorological season are identical to the pollen season it represents, that is, the beginning of the meteorological season (julian date) is the date for which the accumulated sum of a pollen season reaches 2.5% of the annual total and the end of the meteorological season (julian date) is when the sum reaches 97.5%.

2.3. Statistical analysis

Analyses of the goodness of fit of the data to a normal distribution were done prior to hypothesis testing (Kolmogorov-Smirnoff test) on SPSS 11.0. Since all of the data presented normal distributions, no transformation was necessary. Linear regressions between pollen and meteorological data were also carried out on SPSS 11.0. and interannual pollen and meteorological variations were performed on Excel. Meteorological data and pollen parameters were respectively identified as independent and dependent variables. The first step of this study was to determine whether climate variability can be observed in Montreal between 1985 and 1998 (at first using annual meteorological data) and then observe if this change is more pronounced during the pollen seasons (when using seasonal meteorological data). The effects of any climate variation were then examined on the characteristics of the pollen seasons and finally, trends in pollen seasons were deduced.

3. Results

3.1. Trends in weather

Before discussing impacts on pollen seasons, we, at first, attempts to see if it is possible to detect any trends in the weather data for Montreal for the chosen period (1985-1998). Trend analyses of the annual meteorological data show a general increase for both temperature and precipitation. Figures 1a to 1d allow for the visualization of the yearly variations of the annual meteorological data (see Table 1 for data). The 14 yearly trends for temperatures are generally below 1°C and only the annual minimum temperature exceeded the 1°C threshold of increase in 1998. The annual maximum temperature increased by 0.64°C and the annual mean temperature by 0.82°C . The trends in the annual temperatures are thus generally small and, moreover, not statistically significant (Table 1). Yearly trends for annual precipitation are more pronounced (Fig. 1d). In fact, the slope parameter of the linear model is the highest found (6.71 mm per year) and the increase from 1985 to 1998 corresponds to an additional 87 mm of precipitation. However, none of these trends is significant at the 0.05 level. Overall, the statistical significance of the trends of the annual temperatures and precipitation approximate on average 0.29 . Since, in our results, this seems to be the probability level associated to climatic trends (our independent variables) for the period 1985-1998, only probability of $\alpha=0.30$ will be discussed for our dependant variables (pollen parameters).

Table 1 : Annual meteorological data.

ANNUAL METEOROLOGY	Sig. ¹	R2 ²	Annual trend	Change (1985-1998)
Yearly maximum temperature (°C)	0.374	0.066	0.05	0.64
Yearly minimum temperature (°C)	0.212	0.127	0.08	1.01
Yearly mean temperature (°C)	0.288	0.093	0.06	0.82
Annual precipitations (mm)	0.313	0.085	6.72	87.32

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

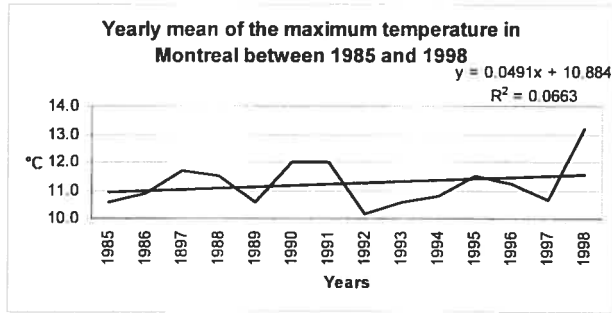


Figure 1a. Variations in annual maximum temperature.

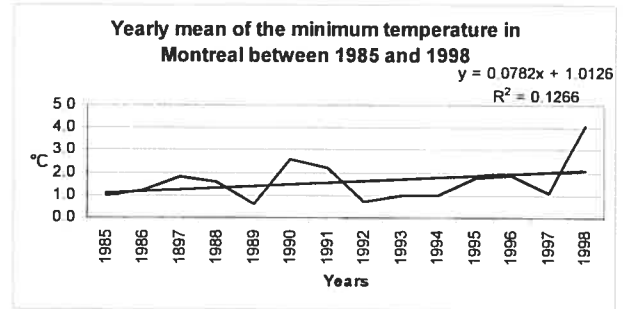


Figure 1b. Variations in annual minimum temperature.

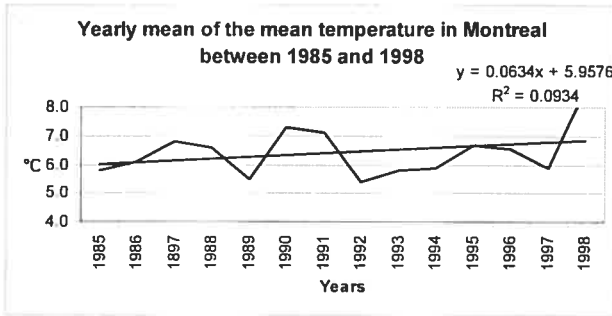


Figure 1c. Variations in annual mean temperature.

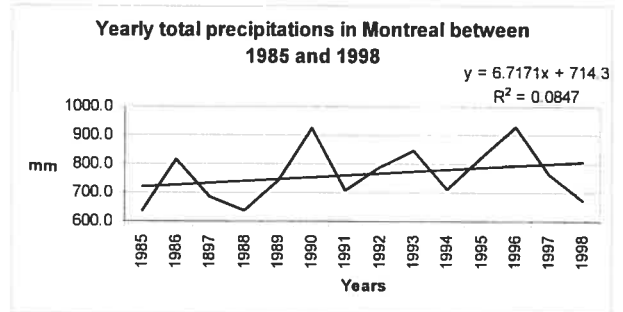


Figure 1d. Variations in annual precipitation.

Table 2 shows all the trends and significances for the seasonal meteorological data. Since we have decided to use $p < 0.30$ as a reference, we focused on results for which $p < 0.30$. Variations in the meteorological seasons show positive and negative trends (Table 2). However, all trends are positive for $p < 0.30$. There was no differences in the average probability for weather variables ($0.42 < p < 0.48$). *Betula* average probability was much larger ($p = 0.78$) than those found for other taxa ($0.31 < p < 0.44$). The only true significant trend ($p = 0.03$) in the seasonal meteorology was found for precipitation for the *Quercus* pollen season and for minimum temperature for the grasses pollen season. Looking at the results showing a $p < 0.30$ - the threshold found for annual weather trends - we can conclude that the only preeminent trends are found for precipitation in the *Acer* pollen season, maximum and mean temperature in the grasses pollen season and minimum temperature in the *Ambrosia* pollen season. In summary, climatic trends are variable but are also more statistically significant in the pollen seasons, as compared to annual trends. Also, negative trends were predominant for the tree taxa pollen seasons.

Table 2 : Seasonal meteorological data.

SEASON	SEASONAL METEOROLOGY	Sig. ¹	R2 ²	Annual trend	Change (1985-1998)
ACER	Maximum temperature (°C)	0.429	0.053	-0.128	-1.7
	Minimum temperature (°C)	0.57	0.028	-0.077	-1.0
	Mean temperature (°C)	0.486	0.041	-0.103	-1.3
	Total precipitations (mm)	0.081 *	0.232	4.72	61.4
BETULA	Maximum temperature (°C)	0.847	0.003	-0.018	-0.2
	Minimum temperature (°C)	0.877	0.002	0.013	0.2
	Mean temperature (°C)	0.983	0	-0.0018	0.0
	Total precipitations (mm)	0.431	0.052	2.14	27.8
QUERCUS	Maximum temperature (°C)	0.416	0.056	-0.096	-1.2
	Minimum temperature (°C)	0.535	0.033	-0.072	-0.9
	Mean temperature (°C)	0.458	0.047	-0.084	-1.1
	Total precipitations (mm)	0.032 *	0.327	2.189	28.5
GRAMINEAE	Maximum temperature (°C)	0.262 *	0.104	0.064	0.8
	Minimum temperature (°C)	0.036 *	0.317	0.09	1.2
	Mean temperature (°C)	0.102 *	0.207	0.078	1.0
	Total precipitations (mm)	0.853	0.003	-0.73	-9.5
AMBROSIA	Maximum temperature (°C)	0.456	0.047	0.065	0.8
	Minimum temperature (°C)	0.248 *	0.109	0.081	1.1
	Mean temperature (°C)	0.333	0.078	0.073	0.9
	Total precipitations (mm)	0.742	0.009	0.731	9.5

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

* Data for which $p < 0.30$.

3.2. Effects of the weather trends on the characteristics of pollen seasons

After reviewing the meteorological trends, what are their influence on pollen season characteristics? So far, we analyzed the significance of trend for all of the seasonal meteorological pollen season (Table 2) and extracted results for which p is below 0.30 (Figures 2a to 2f). We are now correlating these results with the corresponding pollen season parameters (Tables 3a to 3f). Only *Quercus* (Table 3b) – and for almost all the parameters of its pollen season characteristics – and *Acer* (Table 3a) – for the length of its pollen season – showed significant correlation with seasonal precipitation. Generally, when we average the significance of trends for each of the seasonal meteorological seasons below (Tables 3a to 3f), only *Quercus* (Table 3b) and grasses (Tables 3c to 3e) show a probably significance of 0.30.

Table 3a: Correlation between the total precipitation during the pollen season of *Acer* and the pollen parameters of *Acer*.

	Sig. ¹	R ² ²	Annual trend
Beginning <i>Acer</i> (date) & seasonal precipitation (mm)	0.492	0.04	-0.05
End <i>Acer</i> (date) & seasonal precipitation (mm)	0.282 *	0.096	0.07
Length <i>Acer</i> (nb. of days) & seasonal precipitation (mm)	0.013 *	0.417	0.12
Peak <i>Acer</i> (μm^3) & seasonal precipitation (mm)	0.936	0.001	0.11
Peak-Date <i>Acer</i> (date) & seasonal precipitation (mm)	0.494	0.04	0.07
Pollen Count <i>Acer</i> (pollen index) & seasonal precipitation (mm)	0.596	0.024	3.47

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

* Data for which $p < 0.30$.

Table 3b: Correlation between the total precipitation during the pollen season of *Quercus* and the pollen parameters of *Quercus*.

	Sig. ¹	R2 ²	Annual trend
Beginning <i>Quercus</i> (date) & seasonal precipitation (mm)	0.056 *	0.271	-0.12
End <i>Quercus</i> (date) & seasonal precipitation (mm)	0.014 *	0.408	0.14
Length <i>Quercus</i> (nb. of days) & seasonal precipitation (mm)	<0.001 *	0.686	0.26
Peak <i>Quercus</i> & seasonal precipitation (mm)	0.029 *	0.337	-6.91
Peak-Date <i>Quercus</i> (date) & seasonal precipitation (mm)	0.039 *	0.308	0.12
Pollen Count <i>Quercus</i> (pollen index) & seasonal precipitation (mm) *	0.01	0.434	-12.68

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

* Data for which $p < 0.30$.

Table 3c: Correlation between the maximum temperature during the pollen season of *Gramineae* and the pollen parameters of *Gramineae*.

	Sig. ¹	R2 ²	Annual trend
Beginning <i>Gramineae</i> (date) & seasonal maximum temperature (°C)	0.757	0.008	-0.63
End <i>Gramineae</i> (date) & seasonal maximum temperature (°C)	0.455	0.047	1.07
Length <i>Gramineae</i> (nb. of days) & seasonal maximum temperature (°C)	0.475	0.043	1.71
Peak <i>Gramineae</i> & seasonal maximum temperature (°C)	0.896	0.001	2.91
Peak-Date <i>Gramineae</i> (date) & seasonal maximum temperature (°C)	0.972	0	-0.16
Pollen Count <i>Gramineae</i> (pollen index) & seasonal maximum temperature (°C)	0.508	0.037	113.17

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

Table 3d: Correlation between the minimum temperature during the pollen season of *Gramineae* and the pollen parameters of *Gramineae*.

	Sig. ¹	R2 ²	Annual trend
Beginning <i>Gramineae</i> (date) & seasonal minimum temperature (°C)	0.804	0.005	-0.63
End <i>Gramineae</i> (date) & seasonal minimum temperature (°C)	0.391	0.062	1.52
Length <i>Gramineae</i> (nb. of days) & seasonal minimum temperature (°C)	0.467	0.045	2.15
Peak <i>Gramineae</i> & seasonal minimum temperature (°C)	0.593	0.025	-14.6
Peak-Date <i>Gramineae</i> (date) & seasonal minimum temperature (°C)	0.512	0.37	3.62
Pollen Count <i>Gramineae</i> (pollen index) & seasonal minimum temperature (°C)	0.79	0	5.67

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

Table 3e: Correlation between the mean temperature during the pollen season of *Gramineae* and the pollen parameters of *Gramineae*.

	Sig. ¹	R2 ²	Annual trend
Beginning <i>Gramineae</i> (date) & seasonal mean temperature (°C)	0.762	0.008	-0.72
End <i>Gramineae</i> (date) & seasonal mean temperature (°C)	0.402	0.059	1.39
Length <i>Gramineae</i> (nb. of days) & seasonal mean temperature (°C)	0.446	0.049	2.11
Peak <i>Gramineae</i> & seasonal mean temperature (°C)	0.86	0.003	-4.54
Peak-Date <i>Gramineae</i> (date) & seasonal mean temperature (°C)	0.786	0.006	1.41
Pollen Count <i>Gramineae</i> (pollen index) & seasonal mean temperature (°C)	0.703	0.013	76.15

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

Table 3f: Correlation between the minimum temperature during the pollen season of *Ambrosia* and the pollen parameters of *Ambrosia*.

	Sig. ¹	R ² ²	Annual trend
Beginning <i>Ambrosia</i> (date) & seasonal minimum temperature (°C)	0.122 *	0.187	-0.76
End <i>Ambrosia</i> (date) & seasonal minimum temperature (°C)	0.378	0.083	-1.8
Length <i>Ambrosia</i> (nb. of days) & seasonal minimum temperature (°C)	0.69	0.014	-0.42
Peak <i>Ambrosia</i> & seasonal minimum temperature (°C)	0.349	0.073	57.61
Peak-Date <i>Ambrosia</i> (date) & seasonal minimum temperature (°C)	0.914	0.001	0.18
Pollen Count <i>Ambrosia</i> (pollen index) & seasonal minimum temperature (°C)	0.457	0.047	277.25

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

* Data for which $p < 0.30$.

Tables 4a to 4d show the influence of all of the annual weather parameters on pollen season parameters. Only values of $p < 0.30$ are shown. The only statistically significant results ($p < 0.05$) were found for the beginning and length of grasses correlated with either with maximum annual temperature (Table 4a), with minimum annual temperature (Table 4b) or annual mean temperature (Table 4c). In all cases, the beginning of the season is earlier and the length of the season increases. Interestingly, the increase of annual total precipitation has a negative impact on the peak of *Betula* ($p < 0.001$) and on the total pollen count of *Gramineae* ($p = 0.012$), and a positive impact on the beginning of the season of *Gramineae* ($p = 0.027$) (Table 4d).

Table 4a.: Correlation between the annual maximum temperature and the pollen parameters

(Results shown are when $p < 0.30$ only).

	Sig. ¹	R ² ²	Annual trend	
Beginning <i>Gramineae</i> (date) & annual maximum temperature (°C)	0.015	0.4	-4.61	p<0.05
Length <i>Gramineae</i> (nb. of days) & annual maximum temperature (°C)	0.025	0.351	5.11	
Beginning <i>Acer</i> (date) & annual maximum temperature (°C)	0.068	0.25	-6.6	p<0.1
Beginning <i>Betula</i> (date) & annual maximum temperature (°C)	0.086	0.226	-4.3	
End <i>Betula</i> (date) & annual maximum temperature (°C)	0.067	0.253	-5.46	
Peak-Date <i>Acer</i> (date) & annual maximum temperature (°C)	0.165	0.154	-7.17	p<0.2
Pollen Count <i>Betula</i> (pollen index) & annual maximum temperature (°C)	0.114	0.195	1889.11	
Length <i>Acer</i> (nb. of days) & annual maximum temperature (°C)	0.229	0.118	3.3	p<0.3
End <i>Quercus</i> (date) & annual maximum temperature (°C)	0.247	0.11	-3.44	
Peak-Date <i>Quercus</i> (date) & annual maximum temperature (°C)	0.231	0.117	-3.64	
Peak-Date <i>Gramineae</i> (date) & annual maximum temperature (°C)	0.287	0.094	-4.9	

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

Table 4b.: Correlation between the annual minimum temperature and the pollen parameters

(Results shown are when $p < 0.30$ only).

	Sig. ¹	R ² ²	Annual trend	
Beginning <i>Gramineae</i> (date) & annual minimum temperature (°C)	0.025	0.354	-3.77	p<0.05
Length <i>Gramineae</i> (nb. of days) & annual minimum temperature (°C)	0.032	0.329	4.29	
Beginning <i>Acer</i> (date) & annual minimum temperature (°C)	0.077	0.238	-5.58	p<0.1
End <i>Betula</i> (date) & annual minimum temperature (°C)	0.084	0.228	-4.5	
Peak <i>Acer</i> (p/m ³) & annual minimum temperature (°C)	0.172	0.149	-0.8587	p<0.2
Peak-Date <i>Acer</i> (date) & annual minimum temperature (°C)	0.144	0.411	-6.51	
Beginning <i>Betula</i> (date) & annual minimum temperature (°C)	0.121	0.188	-3.4	
Pollen Count <i>Betula</i> (pollen index) & annual minimum temperature (°C)	0.194	0.136	1368.76	
Peak-Date <i>Quercus</i> (date) & annual minimum temperature (°C)	0.184	0.142	-3.47	
Length <i>Acer</i> (nb. of days) & annual minimum temperature (°C)	0.221	0.122	2.91	p<0.3
Beginning <i>Quercus</i> (date) & annual minimum temperature (°C)	0.26	0.104	-3.247	
End <i>Quercus</i> (date) & annual minimum temperature (°C)	0.238	0.114	-3.041	

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

Table 4c.: Correlation between the annual mean temperature and the pollen parameters

(Results shown are when $p < 0.30$ only).

	Sig. ¹	R ² ¹	Annual trend	
Beginning <i>Gramineae</i> (date) & annual mean temperature (°C)	0.018	0.387	-4.17	p<0.05
Length <i>Gramineae</i> (nb. of days) & annual mean temperature (°C)	0.023	0.363	4.77	
Beginning <i>Acer</i> (date) & annual mean temperature (°C)	0.055	0.273	-6.34	p<0.1
Beginning <i>Betula</i> (date) & annual mean temperature (°C)	0.091	0.468	-3.89	
End <i>Betula</i> (date) & annual mean temperature (°C)	0.081	0.232	-4.81	
Peak-Date <i>Acer</i> (date) & annual mean temperature (°C)	0.138	0.174	-7	p<0.2
Pollen Count <i>Betula</i> (pollen index) & annual mean temperature (°C)	0.148	0.166	1603.26	
Peak <i>Acer</i> (p/m ³) & annual mean temperature (°C)	0.28	0.097	-68.123	p<0.3
Length <i>Acer</i> (nb. of days) & annual mean temperature (°C)	0.203	0.131	3.21	
End <i>Quercus</i> (date) & annual mean temperature (°C)	0.236	0.115	-3.24	
Peak-Date <i>Quercus</i> (date) & annual mean temperature (°C)	0.221	0.122	-3.41	

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

Table 4d.: Correlation between the annual total precipitation and the pollen parameters

(Results shown are when $p < 0.30$ only).

	Sig. ¹	R ² ¹	Annual trend	
Peak <i>Betula</i> & annual precipitation (mm)	<0.001	0.611	-4.17	p<0.05
Beginning <i>Gramineae</i> (date) & annual precipitation (mm)	0.027	0.347	0.035	
Pollen Count <i>Gramineae</i> (pollen index) & annual precipitation (mm)	0.012	0.418	-3.27	
Pollen Count <i>Betula</i> (pollen index) & annual precipitation (mm)	0.051	0.282	-18.76	p<0.1
Peak <i>Gramineae</i> (μm^3) & annual precipitation (mm)	0.054	0.275	-0.342	
Peak <i>Ambrosia</i> & annual precipitation (mm)	0.093	0.217	-1.05	
Pollen Count <i>Ambrosia</i> (pollen index) & annual precipitation (mm)	0.08	0.234	-6.56	p<0.2
Length <i>Acer</i> (nb. of days) & annual precipitation (mm)	0.102	0.208	0.036	
Pollen Count <i>Quercus</i> (pollen index) & annual precipitation (mm)	0.173	0.149	-2.97	
Peak-Date <i>Gramineae</i> (date) & annual precipitation (mm)	0.192	0.137	0.049	
Length <i>Gramineae</i> (nb. of days) & annual precipitation (mm)	0.11	0.199	-0.003	p<0.3
End <i>Betula</i> (date) & annual precipitation (mm)	0.236	0.115	0.03	
Peak-Date <i>Betula</i> (date) & annual precipitation (mm)	0.266	0.102	0.037	

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

3.3. Pollen seasons trends

Now, do any of these significant weather trends have an impact on the pollen season trends? Table 5 presents the significance of trends for each parameter of each of the pollen season between 1985 and 1998, and Figures 3a and 3b show the most statistically significant results ($p < 0.05$). Only the beginning and length of the *Quercus* pollen season show statistical significance, both with values of p of 0.007 (Figures 3a and 3b). In 1998, the *Quercus* pollen season begins 19 days earlier and the season is 25 days longer. If we consider the pollen seasons' characteristics, the most influenced are, on average, the length of the pollen season (average of $p=0.22$) followed by the peak value (negative correlation with an average of $p=0.25$) then total

count (negative correlation), beginning of season, end of season and date of peak-value.

Table 5 : Trends of the most allergenic taxa of Montreal between 1985 and 1998.

PARAMETER	POLLEN SEASON	Sig. ¹	R ² ²	Annual trend	Change (1985-1998)
BEGINNING	<i>Acer</i>	0.468	0.045	-0.53	-6.9
	<i>Betula</i>	0.852	0.003	0.09	1.2
	<i>Quercus</i>	0.007 *	0.472	-1.52	-19.7
	<i>Gramineae</i>	0.399	0.06	-0.34	-4.4
	<i>Ambrosia</i>	0.376	0.066	-0.11	-1.4
END	<i>Acer</i>	0.693	0.013	0.26	3.3
	<i>Betula</i>	0.597	0.025	0.33	4.3
	<i>Quercus</i>	0.414	0.056	0.47	6.1
	<i>Gramineae</i>	0.262 *	0.104	0.32	4.1
	<i>Ambrosia</i>	0.324	0.081	0.29	3.7
LENGTH	<i>Acer</i>	0.126 *	0.184	0.79	10.2
	<i>Betula</i>	0.744	0.009	0.24	3.1
	<i>Quercus</i>	0.007 *	0.465	1.99	25.9
	<i>Gramineae</i>	0.155 *	0.161	0.66	8.6
	<i>Ambrosia</i>	0.108 *	0.201	0.4	5.1
PEAK	<i>Acer</i>	0.236 *	0.115	-15.41	-200.3
	<i>Betula</i>	0.554	0.03	-21.33	-277.3
	<i>Quercus</i>	0.237 *	0.114	-37.19	-483.5
	<i>Gramineae</i>	0.087 *	0.225	-7.13	-92.7
	<i>Ambrosia</i>	0.175 *	0.148	-20.04	-260.5
PEAK-DATE	<i>Acer</i>	0.645	0.018	-0.47	-6.1
	<i>Betula</i>	0.724	0.011	0.28	3.7
	<i>Quercus</i>	0.249 *	0.109	0.67	8.7
	<i>Gramineae</i>	0.367	0.068	0.8	10.4
	<i>Ambrosia</i>	0.978	0	-0.01	-0.1
POLLEN COUNT	<i>Acer</i>	0.345	0.075	-60.02	-780.3
	<i>Betula</i>	0.711	0.012	88.89	1155.6
	<i>Quercus</i>	0.44	0.051	-39.98	-519.7
	<i>Gramineae</i>	0.091 *	0.22	-54.89	-713.6
	<i>Ambrosia</i>	0.148 *	0.166	-127.66	-1659.6

¹ Significance of trend

² Coefficient of determination

* Data for which $p < 0.30$.

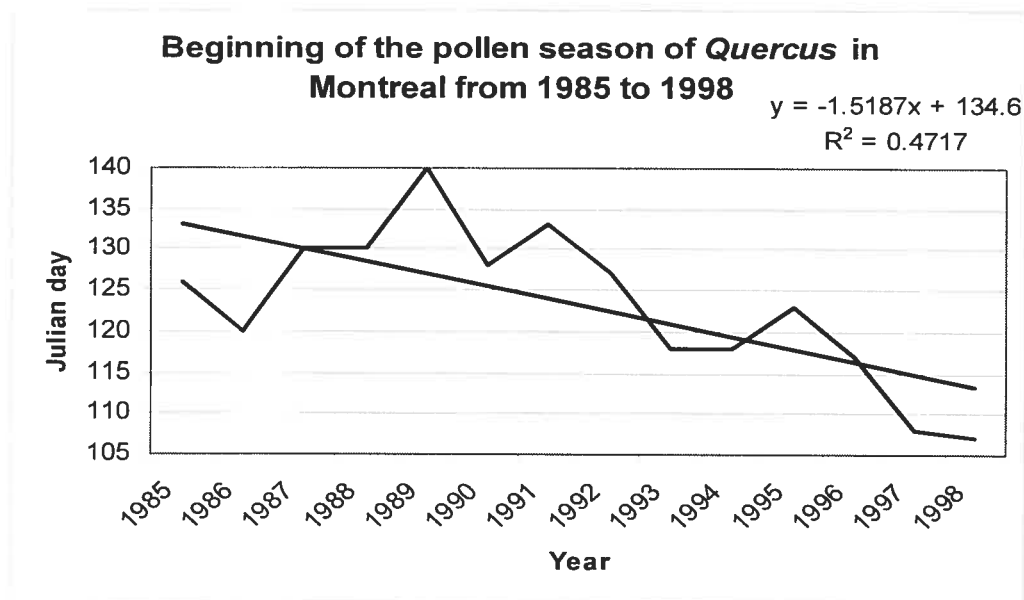


Figure 3a. Variation of the beginning of the pollen season of *Quercus* in Montreal from 1985 to 1998

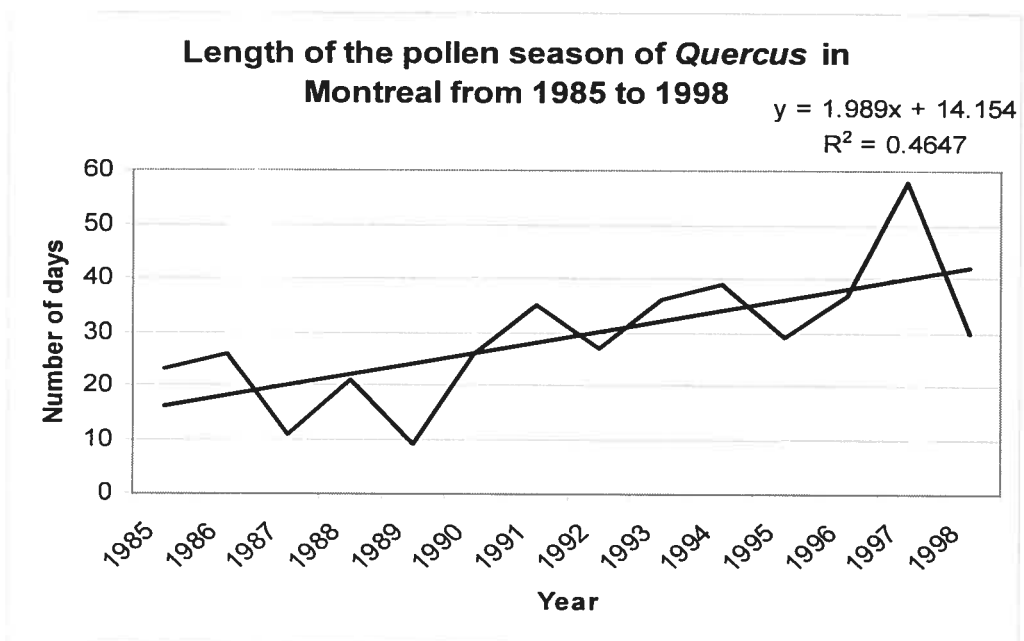


Figure 3b. Variation of the length of the pollen season of *Quercus* in Montreal from 1985 to 1998

4. Discussion

The 1990's decade and in particular, the year 1998 are considered to be the warmest since 1896 (Houghton *et al.*, 2001). The study of temperature variations in Montreal confirms that between 1985 and 1998, temperatures increased and peaked in 1998. Precipitation also increased between 1985 and 1998 in Montreal, a fact compatible with the predicted augmentation of precipitation by 2050 (Bergeron *et al.*, 1997). According to our results, none of the annual trends were statistically significant at the 0.05 level, but the probability of trends of the annual temperatures and precipitation approximates on average 0.29. This means that even if for all parameters, the slope - therefore the trend - is positive, we can only have a confidence of 70% that this trend is not a result of a random fluctuation. This is much lower than the 95% usually accepted as the threshold for significant results. It is most probably a reflection of the restricted number of years integrated in this study (14 years interval).

The seasonal meteorology trends showed better results and those of $p < 0.30$ were all positive, which means that temperatures and precipitation also increased if we consider only pollen seasons for the 1985-1998 period. Climatic conditions during the pollen season of *Gramineae* appear to be the most significant, probably because the pollen season of grasses is – in our study – the longest one. This adds proof to the link between the length of the study period and significance. Climatic trends were more variable for the pollen seasons compared to the annual trends; this difference in results could be a consequence of the number of days representing each season which varies according to each taxa, and the time of the year at which occurs the pollen season, which is not similar for each taxa. As climatic trends were more statistically significant in the pollen seasons, it seems that climate variation is more perceptible on pollen when pinpointed to the anthesis period. Indeed, Myneni *et al.* (1997) observed a pronounced increase in late winter and early spring temperatures and according to Ahas *et al.* (2002), numerous studies showed significant temperature change in the winter and the spring seasons. We can thus assert – at least for this study – that there is no clear evidence of statistically significant climate variations in a short period of

study (14 years) but, on the other hand, climatic variations are more apparent when seasons – instead of years – are considered.

Changes in population of plants to temperature increases are most notable in the northeast and northwestern parts of North America (Ahas *et al.*, 2002) and in higher latitudes (between 45°N and 72°N) (Root *et al.*, 2003; Myneni *et al.*, 1997). Changes include earlier spring events such as flowering and leaf unfolding and later autumn phases such as leaf coloring and leaf fall which have been observed in the last 50 years (Chmielewski and Rötzer, 2000; Root *et al.*, 2002; Hughes, 2000; Defila and Clot, 2001; Menzel, 2000; Walther *et al.*, 2002; Ahas *et al.*, 2002). Consequently, and because of its geographical location, such phenological changes are thus expected to occur in Montreal (45° 28' N, see methods).

Phenological studies have received increasing attention as bio-indicator for Global Change (Menzel, 2003) and phenology is a good predictor of aerobiology (Comtois *et al.*, 1993). Moreover, numerous studies showed that the rate of change varies between species, location and time of the year (Root *et al.*, 2003; Ahas *et al.*, 2002; Defila and Clot, 2001). Root *et al.* (2003) for example, analyzed 143 studies examining the response of species to global warming and found from meta-analyses that not all species showed change over time. In our study, we observed that species behave very differently and not all of them react to climatic variations to the same extent. *Quercus* is known to have a bi-annual cycle (Anderson, 1980) and Sherknies (1990) showed that its pollen curve was the least constant from year to year. This might explain why only the beginning and the length of the pollen season of *Quercus* showed statistically significant results.

Pollen seasons of trees are more influenced by precipitation than temperatures (Glassheim *et al.*, 1995); this observation is consistent with our results where we found that seasonal precipitation have a significant effect on the characteristics of the pollen season of *Quercus* as well as on the length and the end of *Acer*. On the other

hand, the reason why annual temperatures influence the beginning and the length of the pollen season of *Gramineae* may be because temperature is the main controlling factor at the start of the grass pollen season (Fernández-González *et al.*, 1999). This difference in results (trees influenced by precipitation and grasses influenced by temperatures) has also been previously mentioned by Altıntaş *et al.* (2004) who noticed an effect of humidity and rainfall on both grasses and herb pollen and positive correlations between tree pollen counts and temperature and humidity. Furthermore, if we compare the probability between trees and precipitation on one hand ($p < 0.05$), and temperatures and grasses on the other hand ($p > 0.05$), we observe that trees react stronger to climate fluctuations than grasses and weeds, as previously mentioned by Clot (2003).

Like many authors (Teranishi *et al.*, 2000; Galán *et al.*, 2000), we found pollen seasons to begin earlier and end later. Timing of flowering is a good indicator because in general, pollen in the atmosphere is posterior to the first bloom (Comtois *et al.*, 1993); therefore, an earlier flowering implies an earlier pollen presence in the atmosphere. Also, the increase of plants in growth associated with the lengthening of the active growing season (Myneni *et al.*, 1997) may explain the lengthening of the pollen seasons. However, except for *Betula*, the decrease in annual pollen counts contradicts with most studies (Rasmussen, 2002; Higham, 1998; Teranishi *et al.*, 2000) where a rise in annual pollen count has been observed. A possible explanation of this decrease is the increase in precipitation which is known to considerably reduce the concentration of airborne pollen (Mandrioli *et al.*, 1998; Galán *et al.*, 2000; Barnes *et al.*, 2001; Bauman, 1996; Celenza *et al.*, 1996). As for *Betula*, studies in Europe confirm a rise in the annual pollen count for the past 30 years (Spieksma *et al.*, 2003; Frei, 1998).

If longer and earlier pollen seasons may affect allergic people for a longer period of time, people who suffer from hay fever will be confronted with a significant continuous advance of the pollen season (Van Vliet *et al.*, 2002). However, because

of the decrease in pollen count, the daily exposure to allergenic pollen should be reduced, and it clearly occurs that the peak-values decrease too. In short, an increasing prevalence of allergies has been observed in recent years (Clot, 2003) and in particular in Montreal (RMQA, 1998); but on the other hand, a decrease in pollen count and peak-values between 1985 and 1998 has been noticed in Montreal. So, what are the causes of the increasing prevalence of allergies? Warmer temperatures can increase air pollution and thus, have an impact on health (Houghton *et al.*, 2001). Moreover, pollution has been observed to affect the respiratory system and pollutants enhance the allergenicity of pollen grain proteins (Laaidi *et al.*, 1997, Emberlin, 1998). This might explain why people become more sensitive to airborne pollen. Many other aspects should be taken into account, such as changes in diet, housing, family size or indoors allergens (Emberlin, 1998). Further possible reasons for the increasing prevalence of allergies should thus be explored in the future.

5. Conclusion

The restricted number of years in our study is a possible cause for statistically non-significant results for climatic trends. Although we observed no clear evidence of annual climate variations between 1985 and 1998, climate variability appeared to be more apparent in pollen seasons. Species behave very differently and not all of them react to climatic variations to the same extent. In general seasonal precipitation has an effect on the characteristics of the pollen season of trees whereas annual temperatures influence grasses. Moreover, because of the observed decrease in pollen count and peak-values, further possible reasons for the increasing prevalence of allergies should be explored in the future. Our study confirms that it is premature at this point to conclude to the necessity to an adaptation to increases in airborne pollen concentration caused by recent climate variations as seen for example in Jossart *et al.* (2002), at least for Montreal. Further analyses of long-term data sets is definitely required, but at this point, short-term studies are important to understand the spatial dynamics of ongoing process in nature (Ahas *et al.*, 2002).

References

- Ahas, R., A. Aasa, A. Menzel, V.G. Fedotova and H. Scheifinger. 2002. « Changes in European spring phenology ». *International Journal of Climatology*, vol. 22, p. 1727-1738.
- Alcázar, P., and P. Comtois. 2000. « The influence of sampler height and orientation on airborne *Ambrosia* pollen counts in Montreal ». *Grana*, vol. 39, n. 6, p. 303-307.
- Anderson, S.T. 1980. « Influence of climatic variation on pollen season severity in wind-pollinated trees and herbs ». *Grana*, vol. 19, p. 47-52.
- Altıntaş, D.U, G.B. Karakoç, M. Yılmaz, M. Pinar, S.G. Kendirli and H. Çakan. 2004. « Relationship between pollen count and weather variables in East-Mediterranean Cost of Turkey ». *Clinical and Developmental Immunology*, vol. 11, p. 87-96.
- Bapikee, C. and P. Comtois. 2004. « Trends in aerobiology: the methodological factor ». Submitted to *Aerobiologia* in October 2004.
- Barnes, C., F. Pacheco, J. Landuyt, F. Hu and J. Portnoy. 2001. « The effect of temperature, relative humidity and rainfall on airborne ragweed pollen concentration ». *Aerobiologia-International Journal of Aerobiology*, vol. 17, n. 1, p. 61-68.
- Basset, J. 1959. « Surveys of air-borne ragweed pollen in Canada with particular reference to sites in Ontario ». *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 39, p.491-497.
- Bauman, A. 1996. « Asthma associated with thunderstorm ». *British Medical Journal*, vol. 312, p. 590-591.
- Beggs, P.J. 2004. « Impact of climate change on aeroallergens ». *Climate and Experimental Allergy*, vol. 34, n. 10, p. 1507-1513.
- Bergeron, L., G. Vigeant and J. Lacroix. 1997. *L'étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique*. Tome V de l'Étude pan-canadienne, Ministère de l'environnement, Canada, 270 p.
- Braun, E. L. 1950. *Deciduous forest of Eastern North America*. The Free Press, New York, 596p.

- Burton, I. 1997. « Vulnerability and adaptative response in the context of climate and climate change ». *Climatic change*, vol. 36, p. 185-196.
- Celenza, A., J. Fothergill, E. Kupek and R.J. Shaw. 1996. « Thunderstorm associated asthma: a detailed analysis of environmental factors ». *British Medical Journal*, vol. 312, p. 604-607.
- Chmielewski, F.M. and T. Rotzer. 2001. « Response of tree phenology to climate change across Europe ». *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 108, p. 101-112.
- Clot, B. 2003. « Trends in airborne pollen: An overview of 21 years of data in Neuchâtel (Switzerland) ». *Aerobiologia*, vol. 19, p. 227-234.
- Cole, D.R. and H.C. Monger. 1994. « Influence of atmospheric CO₂ on the decline of C₄ plants during the last deglaciation ». *Nature*, vol. 368, p. 533-536.
- Coleman, J.S. and F.A. Bazzaz. 1992. « Effects of CO₂ and temperature on growth and resource use of co-occurring C₃ and C₄ annuals ». *Ecology*, vol. 73, n. 4, p. 1244-1259.
- Comtois, P. 1998. « Statistical analysis of aerobiological data ». Chap. *In : Methods in Aerobiology*. Pitagora Editrice Bologna, Bologna (Italie), p.217-258.
- Comtois P. and L. Gagnon. 1988. « Concentration pollinique et fréquence des symptômes de pollinose : une méthode pour déterminer les seuils cliniques ». *Revue Française d'Allergologie*, vol. 28, p. 279-286.
- Comtois, P., and S. Boucher. 1996. « Phenology and aerobiology of short ragweed (*ambrosia artemisiifolia*) pollen ». Chap. *In: Aerobiology*. Lewis Publishers, New York, p.17-26.
- Comtois P., P. Mandrioli and S. Jäger. 1993. « Is airborne a good predictor of flowering phenology? ». Chap. *In: Proceeding of the 13th International Congress of Biometeorology*. Calgary, Alberta, Canada, p. 993-999.
- Defila, C. and B. Clot. 2001. « Phytophenological trends in Switzerland ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, p. 203-207.
- Emberlin, J. 1998. « The effects of air pollution on allergenic pollen ». *Eur Respir Rev*, vol. 8, p. 164-167.
- Emberlin, J. 1997. « The trend to earlier birch pollen season in the UK: a biotic response to changes in weather conditions ». *Grana*, vol. 36, p. 29-33.

- Emberlin, J. C., and J. Norris-Hill. 1996. « The influence of wind speed on the ambient concentrations of pollen from *Gramineae*, *Platanus*, and *Betula* in the air of London, England ». Chap. 3 *In: Aerobiology*. Lewis Publishers, New York. p.27-38.
- Emberlin, J. 1994. « The effects of patterns in climate and pollen abundance on allergy ». *Allergy*, vol. 94, p. 15-20.
- Epton, M. J., I. R. Martin, P. Graham, P. E. Healy, H. Smith, R. Balasubramaniam, I. C. Harvey, D. W. Fountain, J. Hedley and G. I. Town. 1997. « Climate and aeroallergen levels in asthma : A 12 month prospective study ». *Thorax*, vol. 52, p. 528-534.
- Fernández-González, D., R.M. Valencia-Barrera, A. Vega, C. Díaz de la Guardia, M.M. Trigo, P. Cariñanos, C. Pertiñez, F. Rodríguez Rajo and A. Guàrdia. 1999. « Analysis of grass pollen concentrations in the atmosphere of several Spanish sites ». *Polen*, vol. 10, p. 123-132.
- Ford, M. J. 1982. *The changing climate: Responses of the natural flora and fauna*. George Allen and Unwin, London, 190 p.
- Frei, T. 1998. « The effects of climate change in Switzerland 1969-1996 on airborne pollen quantities from hazel, birch and grass ». *Grana*, vol. 37, p. 172-179.
- Galán, C., P. Carinaños, H. García-Mozo, P. Alcázar and E. Domínguez-Vilches. 2001. Model for forecasting *Olea europaea* L. airborne pollen in South-West Andalusia, Spain ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, n. 2, p. 59-63.
- Galán, C., P. Carinaños, H. García-Mozo, P. Alcázar and E. Domínguez-Vilches. 2000. « Meteorological factors affecting daily urticaceae pollen counts in southwest Spain ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 43, n. 4, p. 191-195.
- Galán, C., M.J. Fuillerat, P. Comtois and E. Dominguez-Vilches. 1998. « Bioclimatic factors affecting daily *Cupressaceae* flowering in South West Spain ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 41, n. 3, p. 95-100.
- Gaweski, K. 1987. « Climatic impacts on the vegetation of eastern North America for the past 2000 years ». *Vegetatio*, vol. 68, p.179-190.
- Glassheim, J. W., R. A. Ledoux, T. R. Vaughan, M. A. Damiano, D. L. Goodman, H. S. Nelson and R. W. Weber. 1995. « Analysis of meteorological variables and seasonal aeroallergen pollen counts in Denver, Colorado ». *Annals of Allergy, Asthma, & Immunology*, vol. 75, p. 149-156.

- Grantner, M. 1966. *La végétation forestière du Québec méridional*. Presses de l'Université Laval, Québec, 216 p.
- Gregory, P. H. 1973. *Microbiology of the atmosphere*. 2nd ed. Halsted Press, New York, 377 p.
- Higham, J. H. 1998. « Orage et asthme : Le cas des 24-25 juin 1994 dans le sud-est de l'Angleterre ». *Climat et Santé*, n. 18, p. 37-50.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van Der Linden, X. Dai, K. Maskell and C.A. Johnson. 2001. *Climate change 2001: The scientific basis*. Contribution of working group I for the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, New York, 881 p.
- Hughes, L. 2000. « Biological consequences of global warming: is the signal already apparent? ». *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 15, p. 56-61.
- Jossart, J., M. Garneau, J. Milton, Y. Bonvalot, G. Vigeant and A. Cotnoir, 2002. *La productivité pollinique et son impact potentiel sur la santé : État des connaissances*. Intern report, Québec : Université du Québec à Montréal et service météorologique du Canada, 55 p.
- Knox, R. B. 1979. *Pollen and allergy*. University Park Press, Baltimore, 60 p.
- Laaidi, M. 2001. « Forecasting the start of the pollen season of *Poaceae* : evaluation of some methods based on meteorological factors ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, no 1, p. 1-7.
- Laaidi, M. 1997. « Influence des facteurs météorologiques sur la concentration du pollen dans l'air ». *Climat et Santé*, vol. 17, p. 7-25.
- Laaidi, K, M. Laaidi and J.P. Besancenot. 1997. « Pollens, pollinoses et météorologie ». *La Météo*, vol. 20, p. 41-56.
- Lemmen, D.S. and F.J. Warren. 2004. *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*. Ressources Naturelles Canada, Ontario, 219 p.
- Lemon, E. R. 1983. *CO₂ and plants: The response of plants to rising levels of atmospheric carbon dioxide*. American Association for the Advancement of Science, Washington, 280 p.

- Lewis, W. H., P. Vinay and V. E. Zenger. 1983. *Airborne and allergic pollen in North America*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 254 p.
- Lowry, W. P. 1969. *Weather and life: An introduction to biometeorology*. Academic Press, New York, 305 p.
- Mandrioli, P., P. Comtois and V. Levizzani. 1998. *Methods in Aerobiology*. Pitogara Editrice Bologna, Bologna (Italy), 262 p.
- Menzel, A. 2003. « Plant phenological “fingerprints”, detection of climate change impact ». Chap. In: *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Kluwer, p. 319-329.
- Menzel, A. 2000. « Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996 ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 44, p. 76-81.
- McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White. 2001. *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of working group II for the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, New York, 1032 p.
- Moreno-Grau, S., J.M. Angosto, B. Elvira-Rendueles, J. Bayo, J. Moreno and J. Moreno-Clavel. 2000. « Effects of meteorological parameters and plant distribution on Chenopodiaceae-Amaranthaceae, *Quercus* and *Olea* airborne pollen concentrations in the atmosphere of Cartagena (Spain) ». *Aerobiologia*, vol. 16, p. 17-20.
- Myneni, R.B., C.D. Keeling, C.J. Tucker, G. Asrar and R.R. Nemani. 1997. « Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 ». *Nature*, vol. 386, p. 698-702.
- Newnham, R. M. 1999. « Monitoring biogeographical response to climate change : The potential role of aeropalynology ». *Aerobiologia*, vol 15, p. 87-94.
- Newson, R., D. Strachan, E. Archibald, J. Emberlin, P. Hardaker and C. Collier. 1998. « Acute asthma epidemics, weather and pollen in England, 1987-1994 ». *European Respiratory Journal*, vol 11, p. 694-701.
- Parmesan, C. and G. Yohe. 2003. « A global coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems ». *Nature*, vol. 421, p. 37-42.
- Peters, R. L., and T. E. Lovejoy. 1992. *Global warming and biological diversity*. Yale University, New York, 386 p.

- Pitt, M.D. and H.F. Heady. 1978. « Responses of annual vegetation to temperature and rainfall patterns in Northern California ». *Ecology*, vol. 59, no 2, p. 336-350.
- Rasmussen, A. 2002. « The effects of climate change on the birch pollen season in Denmark ». *Aerobiologia*, vol. 18, p. 253-265.
- Richard, P.J.H. 1998. « Les changements climatiques. Regards vers le passé pour mieux voir l'avenir ». *Interface*, vol. 19, n. 1, p. 36-44.
- RMQA : Regroupement montréalais pour la qualité de l'air. 1998. *Pollution atmosphérique et impact sur la santé et l'environnement*. Detailed report. ISBN 2089494-118-8, 355 p.
- Root, T.L., J.T. Price, K.R. Hall, S.H. Schneider, C. Rosenzweig and J.A. Pounds. 2003. « Fingerprints of global warming on wild animals and plants ». *Nature*, vol. 421, p. 57-60.
- Sherknie, D. 1990. « Un modèle stochastique de prévisions polliniques ». Masters thesis, University of Montreal, Montréal, 108 p.
- Schlütz, F. and W. Zech. 2004. « Palynological investigations on vegetation and climate change in the Late Quarternary of Lake Rukche area, Gorkha Himal, Central Nepal ». *Vegetation History and Archaeobotany*, vol. 13, no 2, p. 81-90.
- Spieksma, F.T.M., J.M. Corden, M. Detandt, W.M. Millington, H. Nikkels, N. Nolard, C.H.H. Schoenmakers, R. Watcher, L.A. de Weger, R. Willems and J. Emberlin. 2003. « Quantitative trends in annual totals of five common airborne pollen types (*Betula*, *Quercus*, Poaceae, *Urtica*, and *Artemisia*), at five pollen-monitoring stations in western Europe ». *Aerobiologia*, vol. 19, p. 171-184.
- Spieksma, F.T., J. Emberlin, M. Hjelmroos, S. Jager, and R.M. Leuschner. 1995. « Atmospheric birch (*Betula*) pollen in Europe: trends and fluctuations in annual quantities and the starting dates of the seasons ». *Grana*, vol.34, p. 51-57.
- Teranishi, H., Y. Kenda, T. Katoh, M. Kasuya, E. Oura and H. Taira. 2000. « Possible role of climate change in the pollen scatters of Japanese cedar *Cryptomeria japonica* in Japan ». *Climate Research*, vol. 14, p. 65-70.
- Teeri, J.A. 1988. « Interaction of temperature and other environmental variables influencing plants distribution ». *Symposia of the Society for Experimental Biology*, vol. 42, p. 77-89.

- Tromp, S. W. 1980. *Biometeorology : The impact of the weather and climate on human and their environment (animals and plants)*.: Heyden and Son Ltd, London, 346p.
- Van Vliet, A., A. Overeem, R.S. De Groot, A.F.G. Jacobs and F.T.M. Spieksma. 2002. « The influence of temperature and climate change on the timing of pollen release in the Netherlands ». *International Journal of Climatology*, vol. 22, p. 1757-1767.
- Villeneuve, C., and F. Richard. 2001. *Vivre les changements climatiques : L'effet de serre expliqué*. Éditions MultiMondes, Sainte-Foy (Qué.), 274 p.
- Walker, B. and W. Steffen. 1997. « An overview of the implications of global change for natural and managed terrestrial ecosystems ». *Ecology and Society*, vol. 1, n. 2, art.2.
- Walther, G.R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T.J.C. Beebee, J.M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg and F. Bairlein. 2002. « Ecological responses to recent climate change ». *Nature*, vol. 416, p. 389-395.
- Weber, R.W. 1998. « Pollen identification ». *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, vol. 80, p. 141-148.
- Weis, E. and J.A. Berry. 1988. « Plants and high temperature stress ». *Symposium Society of Experimental Biology*, vol. 42, p. 329-346.
- Ziska, L. H., D. E. Gebhard, D. A. Frenz, S. Faulkner, B. D. Singer and J. G. Straka. 2002. « Cities as harbingers of climate change : Common ragweed, urbanization, and public health ». *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 111, n. 2, p. 290-295.
- Ziska, L.H. and F.A. Caulfield. 2000. « Rising CO₂ and pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*), a known allergy-inducing species: implications for public health ». *Australian Journal of Plant Physiology*, vol. 27, p. 893-898.

CHAPITRE 4

CONCLUSION DE SYNTHÈSE

La recherche du rôle des variations climatiques sur la concentration pollinique a donné naissance à ce projet. Notre hypothèse de recherche, fondée sur l'existence d'un lien entre les fluctuations annuelles de climat et le comportement des espèces polliniques allergènes, nous a conduit à séparer ce travail en deux parties : dans un premier temps, la question a été de déterminer les critères selon lesquels les paramètres d'une saison pollinique devraient être choisis dans le cadre d'une étude liée aux changements globaux, et dans un deuxième temps, une série d'analyses statistiques entre les données polliniques et météorologiques a été entreprise afin de mettre en évidence tout lien entre les variations de climat et le comportement des taxons polliniques allergènes de Montréal de 1985 à 1998.

La première étape, d'ordre méthodologique (article 1) a consisté à clarifier la méthode à utiliser pour définir les caractéristiques d'une saison pollinique. Il a ainsi été démontré que, selon la définition donnée à un paramètre pollinique, les résultats et l'interprétation qui en découlent peuvent être différents. D'une part, l'utilisation d'un pourcentage ou de points d'inflexion donne des courbes polliniques similaires dans la mesure où ces courbes affichent une certaine régularité dans leur morphologie. Par contre, l'estimation des paramètres pollinique par la méthode de seuils fixes (en pollen/m³) est souvent biaisée car les tendances s'avèrent être très différentes à cause justement du faible seuil utilisé pour déterminer le premier et le dernier jour de la saison. Toutefois, cette méthode a un avantage, celui de pouvoir déterminer le début et la fin de la saison sans avoir à attendre la fin de la période pollinique ; cela étant

dit, il serait tout de même intéressant de ré-évaluer ces deux seuils à la hausse. Dans le cadre d'une étude liée aux changements globaux, l'utilisation des pourcentages ou des points d'inflexion est donc recommandée. Celle des pourcentages est probablement la plus simple à utiliser. De plus, pour les études liées à la santé humaine, il semble plus intéressant de prendre en considération 95% de la concentration annuelle de pollen afin d'inclure le maximum de grains de pollens, et donc de choisir 2,5% de la concentration de pollen atmosphérique totale de l'année pour déterminer le début de la saison pollinique et 97,5% pour en déterminer la fin.

Les paramètres tels que le maximum, la date du maximum et la quantité annuelle de pollen ne sont pas - ou peu - influencés par les facteurs méthodologiques ; par conséquent, ils constituent des paramètres de choix pour les études portant sur le lien entre les fluctuations de climat et le comportement des espèces végétales allergènes.

Nous avons également examiné les effets du lissage des courbes polliniques annuelles. Il en est ressorti que plus les données sont lissées, plus l'estimation de la courbe de tendance est homogène. Il n'est donc pas recommandé d'appliquer une telle méthode dans une étude portant sur la réaction des personnes aux pollens allergènes car l'information portant sur la valeur et la date du maximum est perdue par le lissage des courbes.

C'est donc à la lumière de ces résultats que le choix des paramètres pollinique pour la suite a été facilité. La deuxième étape a été consacrée à l'étude des conséquences des variations climatiques sur les caractéristiques des saisons polliniques des pollens allergènes (article 2). En premier lieu, nous avons observé les variations climatiques survenues à Montréal entre 1985 et 1998 (données météorologiques annuelles), puis nous avons examiné si ce changement était plus prononcé pendant les saisons polliniques (données météorologiques saisonnières). Bien que les résultats aient été peu significatifs – probablement à cause du nombre restreint d'années d'étude (14 ans) – il s'est avéré que les températures et les précipitations annuelles ont augmenté

entre 1985 et 1998. En ce qui a concerné la tendance météorologique durant les saisons polliniques, les résultats étaient à la fois plus variables et plus statistiquement significatifs laissant croire que les variations climatiques sont plus faciles à visualiser durant les saisons polliniques.

Par la suite, l'étude des effets des fluctuations de climat sur les caractéristiques des saisons polliniques ont montré que, d'une part, les saisons polliniques des arbres, et plus particulièrement de *Quercus*, sont davantage influencées par les précipitations saisonnières que par les températures, et que, d'autre part, la température annuelle a un effet sur le début et la longueur de la saison des graminées. Quant à la tendance pollinique de 1985 à 1998, les résultats démontrent que les espèces n'ont pas le même comportement, et que celles dont la production pollinique est la plus variable comme *Quercus* seraient davantage sensibles aux variations climatiques. Il est donc clair que les espèces ne se comportent pas de la même façon face aux variations climatiques, notamment en ce qui a trait à la dichotomie arbres/herbacées.

Enfin, il est imprudent à ce stade de conclure hâtivement à une augmentation de la concentration pollinique due à la variabilité climatique. Contrairement à d'autres études (i.e. Teranishi *et al.*, 2000), nos résultats ont montré une diminution de la valeur maximale et de la concentration pollinique. De plus, nous avons observé que les saisons débutent effectivement plus tôt, durent bien plus longtemps, mais que la concentration pollinique et la valeur du maximum sont moins élevées. Plusieurs auteurs ont pourtant mentionné une augmentation de la prévalence des allergies et cette augmentation a également été observée à Montréal (RMQA, 1998). La question est de savoir quelle en est la cause. Houghton *et al.* (2001) observent une détérioration de la qualité de l'air causée par l'augmentation des températures. La pollution aurait pour effet de sensibiliser les voies respiratoires et les muqueuses, et de plus, les polluants augmenteraient les propriétés allergènes des grains de pollen (Laaidi *et al.*, 1997 ; Emberlin, 1998). La combinaison de ces facteurs pourrait expliquer l'augmentation de la prévalence des allergies. Cependant, d'autres facteurs,

tels que l'environnement dans lequel nous vivons ou les allergies liées à l'air intérieur sont à considérer (Emberlin, 1998). Les raisons d'une augmentation des allergies devront donc être explorées plus en détail dans les recherches futures.

Bibliographie

- Ahas, R., A. Aasa, A. Menzel, V.G. Fedotova et H. Scheifinger. 2002. « Changes in European spring phenology ». *International Journal of Climatology*, vol. 22, p. 1727-1738.
- Alcázar, P., et P. Comtois. 2000. « The influence of sampler height and orientation on airborne *Ambrosia* pollen counts in Montreal ». *Grana*, vol. 39, no 6, p. 303-307.
- Anderson, S.T. 1980. « Influence of climatic variation on pollen season severity in wind-pollinated trees and herbs ». *Grana*, vol. 19, p. 47-52.
- Altıntaş, D.U, G.B. Karakoç, M. Yilmaz, M. Pinar, S.G. Kendirli et H. Çakan. 2004. « Relationship between pollen count and weather variables in East-Mediterranean Coast of Turkey ». *Clinical and Developmental Immunology*, vol. 11, p. 87-96.
- Barnes, C., F. Pacheco, J. Landuyt, F. Hu et J. Portnoy. 2001. « The effect of temperature, relative humidity and rainfall on airborne ragweed pollen concentration ». *Aerobiologia-International Journal of Aerobiology*, vol. 17, no 1, p. 61-68.
- Basset, J. 1959. « Surveys of air-borne ragweed pollen in Canada with particular reference to sites in Ontario ». *Canadian Journal of Plant Science*, vol. 39, p. 491-497.
- Bauman, A. 1996. « Asthma associated with thunderstorm ». *British Medical Journal*, vol. 312, p. 590-591.
- Baillargeon, G. 2003. *Outils statistiques et analyse de données*. Les éditions SMG, Trois-Rivières (Qué.), 579p.
- Bapikee, C. et P. Comtois. 2004. « Trends in aerobiology: the methodological factor ». Submitted to *Aerobiologia* in October 2004.
- Beggs, P.J. 2004. « Impact of climate change on aeroallergens ». *Climate and Experimental Allergy*, vol. 34, no 10, p. 1507-1513.
- Bergeron, L., G. Vigeant et J. Lacroix. 1997. *L'étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique*. Tome V de l'Étude pan-canadienne, Ministère de l'environnement, Canada, 270 p.

- Bradley, N.L., A.C. Leopold, J. Ross et W. Huffaker. 1999. « Phenological changes reflect climate change in Wisconsin ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 96, p. 9701-9704.
- Braun, E. L. 1950. *Deciduous forest of Eastern North America*. The Free Press, New York, 596p.
- Burton, I. 1997. « Vulnerability and adaptive response in the context of climate and climate change ». *Climatic Change*, vol. 36, p. 185-196.
- Celenza, A., J. Fothergill, E. Kupek et R.J. Shaw. 1996. « Thunderstorm associated asthma : a detailed analysis of environmental factors ». *British Medical Journal*, vol. 312, p. 604-607.
- Chmielewski, F.M. et T. Rotzer. 2001. « Response of tree phenology to climate change across Europe ». *Agricultural and Forest Meteorology*, vol. 108, p. 101-112.
- Clewer, A. G., et D. H. Scarisbrick. 2001. *Practical Statistics and experimental design for plant and crop science*. John Wiley et Sons, Chichester (Angleterre), 332 p.
- Clot, B. 2003. « Trends in airborne pollen: An overview of 21 years of data in Neuchâtel (Switzerland) ». *Aerobiologia*, vol. 19, p. 227-234.
- Cole, D.R. et H.C. Monger. 1994. « Influence of atmospheric CO₂ on the decline of C₄ plants during the last deglaciation ». *Nature*, vol. 368, p. 533-536.
- Coleman, J.S. et F.A. Bazzaz. 1992. « Effects of CO₂ and temperature on growth and resource use of co-occurring C₃ and C₄ annuals ». *Ecology*, vol. 73, no 4, p. 1244-1259.
- Comtois, P. 1998. « Statistical analysis of aerobiological data ». Chap. *In : Methods in Aerobiology*. Pitagora Editrice Bologna Bologne (Italie), p.217-258.
- Comtois, P., et S. Boucher. 1996. « Phenology and aerobiology of short ragweed (*ambrosia artemisiifolia*) pollen ». Chap. *In: Aerobiology*. Lewis Publishers, New York, p.17-26.
- Comtois P. et D. Sherknies. 1991. « Pollen curves typology ». *Grana*, vol. 30, p. 184-189.
- Comtois P., P. Mandrioli et S. Jäger. 1993. « Is airborne a good predictor of flowering phenology? ». Chap. *In: Proceeding of the 13th International Congress of Biometeorology*. Calgary, Alberta, Canada, p. 993-999.

- Comtois P. et L. Gagnon. 1988. « Concentration pollinique et fréquence des symptômes de pollinose: une méthode pour déterminer les seuils cliniques ». *Revue Française d'Allergologie*, vol. 28, p. 279-286.
- Dawson, W. R. 1992. « Physiological responses of animals to higher temperatures ». Chap. In: *Global warming and biological diversity*, Yale University. New York, p.158-170.
- Defila, C. et B. Clot. 2001. « Phytophenological trends in Switzerland ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, p. 203-207.
- Dose, V. et A. Menzel., 2004. « Bayesian analysis of climate change impacts in phenology ». *Global Change Ecology*, vol. 10, p. 259-272.
- Emberlin, J. 1998. « The effects of air pollution on allergenic pollen ». *Eur Respir Rev*, vol. 8, p. 164-167.
- Emberlin, J. 1997. « The trend to earlier birch pollen season in the UK: a biotic response to changes in weather conditions ». *Grana*, vol. 36, p. 29-33.
- Emberlin, J. C., et J. Norris-Hill. 1996. « The influence of wind speed on the ambient concentrations of pollen from *Gramineae*, *Platanus*, and *Betula* in the air of London, England ». Chap. 3 In: *Aerobiology*. Lewis Publishers, New York p.27-38.
- Emberlin, J. 1994. « The effects of patterns in climate and pollen abundance on allergy ». *Allergy*, vol. 94, p. 15-20.
- Epton, M. J., I. R. Martin, P. Graham, P. E. Healy, H. Smith, R. Balasubramaniam, I. C. Harvey, D. W. Fountain, J. Hedley et G. I. Town. 1997. « Climate and aeroallergen levels in asthma : A 12 month prospective study ». *Thorax*, vol. 52, p. 528-534.
- Fernández-González, D., R.M. Valencia-Barrera, A. Vega, C. Díaz de la Guardia, M.M. Trigo, P. Cariñanos, C. Pertiñez, F. Rodríguez Rajo et A. Guàrdia. 1999. « Analysis of grass pollen concentrations in the atmosphere of several Spanish sites ». *Polen*, vol. 10, p. 123-132.
- Fitter, A.H. et R.S.R. Fitter. 2002. « Rapid changes in flowering time in British plants ». *Science*, vol. 269, p. 1689-1691.
- Fornaciari M., L. Pieroni, P. Ciuchi et B. Romano. 1997. « A statistical model for correlating airborne pollen grains (*Olea europaea* L.) and some meteorological parameters ». *Agricoltura Mediterranea*, vol. 127, p. 134-137.

- Ford, M. J. 1982. *The changing climate : Responses of the natural flora and fauna*. George Allen and Unwin, London, 190 p.
- Frei, T. 1998. « The effects of climate change in Switzerland 1969-1996 on airborne pollen quantities from hazel, birch and grass ». *Grana*, vol. 37, p. 172-179.
- Galán, C., P. Carinaños, H. García-Mozo, P. Alcázar et E. Domínguez-Vilches. 2001. Model for forecasting *Olea europaea* L. airborne pollen in South-West Andalusia, Spain ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, no 2, p. 59-63.
- Galán, C., P. Carinaños, H. García-Mozo, P. Alcázar et E. Domínguez-Vilches. 2000. « Meteorological factors affecting daily urticaceae pollen counts in southwest Spain ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 43, no 4, p. 191-195.
- Galán, C., M.J. Fuillerat, P. Comtois, E. Dominguez-Vilches. 1998. « Bioclimatic factors affecting daily *Cupressaceae* flowering in South West Spain ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 41, no 3, p. 95-100.
- Gaweski, K. 1987. « Climatic impacts on the vegetation of eastern North America for the past 2000 years ». *Vegetatio*, vol. 68, p.179-190.
- Glassheim, J. W., R. A. Ledoux, T. R. Vaughan, M. A. Damiano, D. L. Goodman, H. S. Nelson et R. W. Weber. 1995. « Analysis of meteorological variables and seasonal aeroallergen pollen counts in Denver, Colorado ». *Annals of Allergy, Asthma & Immunology*, vol. 75, p. 149-156.
- Grabheer, G., M. Gottfried et H. Pauli. 1994. « Climate effects on mountain plants ». *Nature*, vol. 369, no 9, p. 448.
- Grantner, M. 1966. *La végétation forestière du Québec méridional*. Presses de l'Université Laval, Québec, 216 p.
- Gregory, P. H. 1973. *Microbiology of the atmosphere*. 2^e éd. rev. et augm. Halsted Press, New York, 377 p.
- Hamrick, J.L. 2004. « Response of forest trees to global environmental changes ». *Forest Ecology and Management*, vol. 197, p. 323-335.
- Higham, J. H. 1998. « Orage et asthme : Le cas des 24-25 juin 1994 dans le sud-est de l'Angleterre ». *Climat et Santé*, no 18, p. 37-50.

- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van Der Linden, X. Dai, K. Maskell et C.A. Johnson. 2001. *Climate Change 2001: The scientific basis*. Contribution of working group I for the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, New York, 881 p.
- Hufty, A. 1999. *L'atmosphère*. 2^e partie de *Introduction à la climatologie*. Notes et documents de cours, no 14 (mars). Québec : Département de géographie, Université Laval, p. 175-316.
- Hughes, L. 2000. « Biological consequences of global warming: is the change already apparent? ». *Trends in Ecology and Evolution*, vol. 15, p. 56-61.
- Inouye, D.W., M.A. Morales et G.J. Dodge. 2002. « Variation in timing and abundance of flowering by *Delphinium barbeyi* Huth (Ranunculaceae): the roles of snowpack, frost, and La Niña, in the context of climate change ». *Oecologia*, vol. 130, p. 543-550.
- Jato, V., M. J. Aira, M. I. Iglésias, P. Alcázar, P. Cervigón, D. Fernández, M. Recio, L. Ruíz et L. Sbai. 1999. « Aeropalynology of Birch in Spain ». *Polen*, vol. 10, p. 37-47.
- Jossart, J., M. Garneau, J. Milton, Y. Bonvalot, G. Vigeant et A. Cotnoir, 2002. *La productivité pollinique et son impact potentiel sur la santé : État des connaissances*. Rapport interne, Université du Québec à Montréal et Service Météorologique du Canada, Québec, 55 p.
- Knox, R. B. 1979. *Pollen and allergy*. University Park Press, Baltimore, 60 p.
- Korner, C. 2000. « Biosphere responses to CO₂ enrichment ». *Ecological Applications*, vol. 10, p. 1590-161.
- Laaidi, M. 2001. « Forecasting the start of the pollen season of *Poaceae* : evaluation of some methods based on meteorological factors ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 45, no 1, p. 1-7.
- Laaidi, M. 1997. « Influence des facteurs météorologiques sur la concentration du pollen dans l'air ». *Climat et Santé*, vol. 17, p. 7-25.
- Laaidi, K, M. Laaidi et J.P. Besancenot. 1997. « Pollens, pollinoses et météorologie ». *La Météo*, vol. 20, p. 41-56.
- Lejoly-Gabriel, M. 1978. « Recherches écologiques sur la pluie pollinique en Belgique ». *Acta Geographica Lovaniensia*, vol. 13, p. 1-278.

- Lemelin, A. 2003. *Méthodes quantitatives des sciences sociales appliquées aux études urbaines et régionales*. Notes et documents de cours, 2^e édition rev. Montréal : Institut national de la recherche scientifique, 367p.
- Lemmen, D.S. et F.J. Warren. 2004. *Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne*. Ressources Naturelles Canada, Ontario, 219 p.
- Lemon, E. R. 1983. *CO₂ and plants : The response of plants to rising levels of atmospheric carbon dioxide*. American Association for the Advancement of Science, Washington, 280 p.
- Lewis, S.A., J.M. Corden, G.E. Forster et M. Newlands. 2000. « Combined effects of aerobiological pollutants, chemical pollutants and meteorological conditions on asthma admissions and A & E attendances in Derbyshire UK, 1993-96 ». *Clinical and Experimental Allergy*, vol. 30, p. 1724-1732.
- Lewis, W. H., P. Vinay et V. E. Zenger. 1983. *Airborne and allergic pollen in North America*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 254 p.
- Lowry, W. P. 1969. *Weather and life : An introduction to biometeorology*. Academic Press, New York, 305 p.
- Mandrioli, P., P. Comtois et V. Levizzani. 1998. *Methods in aerobiology*.: Pitogara Editrice Bologna, Bologne (Italie), 262 p.
- McCarthy, J.J., O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken et K.S. White. 2001 *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability*. Contribution of working group II for the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, New York, 1032 p.
- Menzel, A. 2003. « Plant phenological “fingerprints”, detection of climate change impact ». Chap. In: *Phenology: An Integrative Environmental Science*. Kluwer, p. 319-329.
- Menzel, A. 2000. « Trends in phenological phases in Europe between 1951 and 1996 ». *International Journal of Biometeorology*, vol. 44, p. 76-81.
- Menzel, A., G. Jakobin, R. Ahas, H. Scheifinger et N. Estrelle. 2003. « Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries ». *International Journal of Climatology*, vol. 23, p. 793-812.

- Moen, J., K. Aune, L. Edenius et A. Angerbjörn. 2004. « Potential effects of climate change on treeline position in the Swedish mountains ». *Ecology and Society*, vol. 9, no 1, art. 16.
- Moreno-Grau, S., J.M. Angosto, B. Elvira-Rendueles, J. Bayo, J. Moreno et J. Moreno-Clavel. 2000. « Effects of meteorological parameters and plant distribution on Chenopodiaceae-Amaranthaceae, *Quercus* and *Olea* airborne pollen concentrations in the atmosphere of Cartagena (Spain) ». *Aerobiologia*, vol. 16, p. 17-20.
- Myneni, R.B., C.D. Keeling, C.J. Tucker, G. Asrar et R.R. Nemani. 1997. « Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991 ». *Nature*, vol. 386, p. 698-702.
- Nakamoto, H., S.H. Zheng, K. Tanaka, A. Yamazaki, T. Furuya, M. Iwaya-Inoue et M. Fukuyama. 2004. « Effects of Carbon dioxide enrichment during different growth periods on flowering, pod set and seed yield in soybean ». *Plant Production Science*, vol. 7, no 1, p. 11-15.
- Nemani, R.R., C.D. Keeling, H. Hashimoto, W.M. Jolly, S.C. Piper, C.J. Tucker, R.B. Myneni et S.W. Running. 2003. « Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999 ». *Science*, vol. 300, p. 1560-1563.
- Nilsson, S., et S. Persson. 1981. « Tree pollen spectra in the Stockholm region ». *Grana*, vol. 20, p. 179-182.
- Newnham, R. M. 1999. « Monitoring biogeographical response to climate change : The potential role of aeropalynology ». *Aerobiologia*, vol 15, p. 87-94.
- Newson, R., D. Strachan, E. Archibald, J. Emberlin, P. Hardaker et C. Collier. 1998. « Acute asthma epidemics, weather and pollen in England, 1987-1994 ». *European Respiratory Journal*, vol 11, p. 694-701.
- Pagney, P. 2000. *La climatologie*. 7^e éd. rev. Coll. « Que sais-je? », no 171. Presses Universitaires de France, Paris, 127 p.
- Parmesan, C. et G. Yohe. 2003. « A global coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems ». *Nature*, vol. 421, p. 37-42.
- Pathirane, L. 1975. « Graphical determination of the main pollen season ». *Pollen et Spores*, vol. 17, p. 609-610.
- Peters, R. L., et T. E. Lovejoy. 1992. *Global warming and biological diversity*. Yale University, New York, 386 p.

- Pitt, M.D. et H.F. Heady. 1978. « Responses of annual vegetation to temperature and rainfall patterns in Northern California ». *Ecology*, vol. 59, no 2, p. 336-350.
- Raghavan, V. 1997. *Molecular embryology of flowering plants*. Cambridge University, New York :Press, 690 p.
- Rasmussen, A. 2002. « The effects of climate change on the birch pollen season in Denmark ». *Aerobiologia*, vol. 18, p. 253-265.
- Richard, P.J.H. 1998. « Les changements climatiques. Regards vers le passé pour mieux voir l'avenir ». *Interface*, vol. 19, no. 1, p. 36-44.
- Riva, M., P. Comtois and T. Ly. 2002. « Pollen counts and risk assessment ». 7th International Congress on Aerobiology, Montebello (Qué.), p. 67.
- RMQA : Regroupement montréalais pour la qualité de l'air. 1998. *Pollution atmosphérique et impact sur la santé et l'environnement*. Rapport détaillé. ISBN 2089494-118-8, 355 p.
- Root, T.L., J.T. Price, K.R. Hall, S.H. Schneider, C. Rosenzweig et J.A. Pounds. 2003. « Fingerprints of global warming on wild animals and plants ». *Nature*, vol. 421, p. 57-60.
- Sherknies, D. 1990. « Un modèle stochastique de prévisions polliniques ». Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, 108 p.
- Schlütz, F. et W. Zech. 2004. « Palynological investigations on vegetation and climate change in the Late Quarternary of Lake Rukche area, Gorkha Himal, Central Nepal ». *Vegetation History and Archaeobotany*, vol. 13, no 2, p. 81-90.
- Sholes, O.D.V. 1994. « Plant survival ». *Nature*, vol. 371, p. 661.
- Smith, S.J., A.M. Thomson, N.J. Rosenberg, R.C. Izaurralde, R.A. Brown et T.M.L. Wigley. 2005. « Climate change impacts for the coterminous USA : an integrated assessment. Part 1. Scenarios and context ». *Climate Change*, vol. 69, p. 7-25.
- Spieksma, F.T.M., J.M. Corden, M. Detandt, W.M. Millington, H. Nikkels, N. Nolard, C.H.H. Schoenmakers, R. Watcher, L.A. de Weger, R. Willems et J. Emberlin. 2003. « Quantitative trends in annual totals of five common airborne pollen types (*Betula*, *Quercus*, Poaceae, *Urtica*, and *Artemisia*), at five pollen-monitoring stations in western Europe ». *Aerobiologia*, vol. 19, p. 171-184.

- Spieksma, F.T., J. Emberlin, M. Hjelmroos, S. Jager, et R.M. Leuschner. 1995. « Atmospheric birch (*Betula*) pollen in Europe: trends and fluctuations in annual quantities and the starting dates of the seasons ». *Grana*, vol.34, p. 51-57.
- Teranishi, H., Y. Kenda, T. Katoh, M. Kasuya, E. Oura et H. Taira. 2000. « Possible role of climate change in the pollen scatters of Japanese cedar *Cryptomeria japonica* in Japan ». *Climate Research*, vol. 14, p. 65-70.
- Teeri, J.A. 1988. « Interaction of temperature and other environmental variables influencing plants distribution ». *Symposia of the Society for Experimental Biology*, vol. 42, p. 77-89.
- Tromp, S. W. 1980. *Biometeorology : The impact of the weather and climate on human and their environment (animals and plants)*. Heyden and Son Ltd, London, 346p.
- Van Doorn, W.G. et U. Van Meeteren. 2003. « Flower opening and closure: a review ». *Journal of Experimental Botany*, vol. 54, no 389, p. 1801-1812.
- Van Vliet, A., A. Overeem, R.S. De Groot, A.F.G. Jacobs et F.T.M. Spieksma. 2002. « The influence of the temperature and climate change on the timing of pollen release in the Netherlands ». *International Journal of Climatology*, vol. 22, p. 1757-1767.
- Villeneuve, C., et F. Richard. 2001. *Vivre les changements climatiques : L'effet de serre expliqué*. Éditions MultiMondes, Sainte-Foy (Qué.), 274 p.
- Walker, B. et W. Steffen. 1997. « An overview of the implications of global change for natural and managed terrestrial ecosystems ». *Conservation Ecology* [online]1(2): 2. Available from the Internet. URL: <http://www.consecol.org/vol1/iss2/art2/>
- Walther, G.R. 2004. « Plants in a warmer world ». *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, vol. 6, p. 169-185.
- Walther, G.R., E. Post, P. Convey, A. Menzel, C. Parmesan, T.J.C. Beebee, J.M. Fromentin, O. Hoegh-Guldberg et F. Bairlein. 2002. « Ecological responses to recent climate change ». *Nature*, vol. 416, p. 389-395.
- Weber, R.W. 1998. « Pollen identification ». *Annals of Allergy, Asthma and Immunology*, vol. 80, p. 141-148.

- Weis, E., J.A. Berry. 1988. « Plants and high temperature stress ». *Symposium Society of Experimental Biology*, vol. 42, p. 329-346.
- Whatley, J. M., et F. R. Whatley. 1980. *Light and plant life*. Edward Arnold, London, 92 p.
- White, M.A., R.R. Nemani, P.E. Thornton et S.W. Running. 2002. « Satellite evidence of phenological differences between urbanized and rural areas of the eastern United States deciduous broadleaf forest ». *Ecosystems*, vol. 5, p. 260-273.
- Wilson, R.J., C.D. Thomas, R. Fox, D.B. Roy et w.E. Kunin. 2004. « Spatial patterns in species distributions reveal biodiversity change ». *Nature*, vol. 432, p. 393-396.
- Witte, R. S., et J. S. Witte. 2001. *Statistics*. 6^e éd. rev. Harcourt College Publishers, Orlando (Fl), 565 p.
- Wodehouse, R.P. 1959. *Pollen grains*. Hafner Publishing Co., New York, 574 p.
- Zhang, X., R. Zang et C. Li. 2004. « Population differences in physiological and morphological adaptations of *Populus davidiana* seedlings in response to progressive drought stress ». *Plant Science*, vol. 166, no 3, p. 791-797.
- Zheng, S.H., H. Nakamoto, K. Yoshikawa, T. Furuya et M. Fukuyama. 2002. « Influences of high night temperatures on flowering and pod setting in soybean ». *Plant Production Science*, vol. 5, no 3, p. 215-218.
- Ziska, L. H., D. E. Gebhard, D. A. Frenz, S. Faulkner, B. D. Singer et J. G. Straka. 2002. « Cities as harbingers of climate change : Common ragweed, urbanization, and public health ». *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, vol. 111, no 2, p. 290-295.
- Ziska, L.H. et F.A. Caulfield. 2000. « Rising CO₂ and pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*), a known allergy-inducing species: implications for public health ». *Australian Journal of Plant Physiology*, vol. 27, p. 893-898.

