

# Analyse des niveaux d'ozone troposphérique à la station forestière de Duschenay (Québec) Bilan des années 1988 à 1991

## *Analysis of tropospheric levels of ozone at Duschenay's research forest site : 1988-1991*

par Alain ROBICHAUD, Norman BERTRAND (\*)

### RÉSUMÉ

Dans le cadre d'un projet géré par la Direction de la recherche du ministère des Forêts du Québec et visant à étudier l'impact des stress environnementaux sur les écosystèmes forestiers, l'ozone ( $O_3$ ), a été échantillonné en continu, à la station forestière de Duschenay, au cours de la période 1988 à 1991. La station de mesure est localisée en milieu forestier, à environ 35 kilomètres au nord-ouest de l'agglomération urbaine de Québec. L'ozone est un contaminant observé en plus forte concentration que tous les autres polluants gazeux avec des niveaux susceptibles d'endommager la végétation. Pour ce polluant, les analyses présentées montrent qu'il existe une forte association entre les moyennes estivales (1<sup>er</sup> avril-30 septembre), la fréquence de dépassements de la norme horaire provinciale (80 ppb) et le type de situation météorologique. Ceci suggère que les fluctuations d'ozone sont déterminées largement par les variations météorologiques et que le transport à longue distance apparaît le phénomène dominant dans l'apparition d'épisodes par l'ozone au site de Duschenay. La production photochimique locale semble jouer un rôle minime dans la problématique des niveaux élevés d'ozone. Dans l'ensemble, les résultats obtenus sont consistants avec un concept de réservoir troposphérique d'ozone ayant des concentrations à peu près semblables à l'échelle régionale (sur une distance de plusieurs centaines de kilomètres).

### ABSTRACT

*Within the framework of a research project managed by the " Direction de la recherche du ministère des Forêts du Québec " which has the goal of studying the impact of environmental stresses on forest ecosystems, ozone ( $O_3$ ) has been sampled continuously at the forest research site of Duschenay during the period 1988-1991. The sampling site is located in a forest environment 35 km northwest of Québec city. Ozone concentrations present levels that can be potentially harmful to vegetation. For this pollutant, analyses presented show that there exists a strong association between seasonal mean (1<sup>st</sup> April-30<sup>th</sup> September) and the frequency of exceedance of the provincial standards (80 ppb) with the type of meteorological situations. This suggests that fluctuations of ozone concentrations are largely determined by meteorological variations and that long distance transport is the dominant phenomenon in the generation of ozone episodes at Duschenay. It is also suggested that the local photochemical production seems to play a minima role in the production of episodes at Duschenay. Results are globally consistent with a concept of " regional tropospheric ozone reservoir " having uniform concentrations at the regional scale over rural areas (scale of few hundreds of kilometers).*

### Mots-clés :

Ozone troposphérique – Forêt – Dépérissement – Transport à longue distance – Facteurs météorologiques – Réservoir troposphérique.

### Keywords :

*Tropospheric ozone – Forest – Forest decline – long range transport – Meteorological factors – tropospheric ozone reservoir.*

### 1. – Introduction

Le dépérissement observé chez diverses espèces de feuilles au début des années 1980 dans les érablières du Québec a sonné le départ de plusieurs projets de recherche forestière. Dans un premier temps, ceux-ci visaient l'évaluation de l'ampleur des dommages ainsi qu'une meilleure compréhension des causes et des mécanismes potentiellement impliqués dans ce phénomène. Le dépérissement est ainsi provoqué par l'action synergétique de multiples stress parmi lesquels les facteurs climatiques et la pollution atmosphérique semblent jouer un rôle primordial (CHEVONE et LINZON, 1988 ;

(\*) Ministère des Forêts, Direction de l'Environnement, 930, Chemin Sainte-Foy, 6<sup>e</sup> étage, Québec (Canada), G1S 4X5.

SMITH, 1980 ; BONNEAU, 1989). Plus spécifiquement, on met en cause certains contaminants atmosphériques à l'état gazeux liés à l'activité humaine tels que l'ozone ( $O_3$ ). L'impact sur les végétaux de ce polluant gazeux a fait l'objet de nombreux projets de recherche à travers le monde, surtout en Europe (GRENNFELT et SCHJOLDAGER, 1984 ; PRINZ et al., 1982) et en Californie (US Congress office of Technology Assessment, 1989). L'ozone est un oxydant photochimique pouvant causer des effets néfastes non seulement à la santé<sup>(1)</sup> mais également aux végétaux (GUDERIAN *et al.*, 1985) et aux matériaux.

Dans le nord-est de l'Amérique du Nord, les épisodes d'ozone sont souvent associés au transport à longue distance de l'ozone et de ses précurseurs et pas seulement à la formation locale (CLARKE et CHING, 1983). Plus spécifiquement, la situation géographique particulière du Québec (localisé en aval d'importantes zones urbaines et industrielles du continent nord-américain), est telle que les niveaux d'ozone et d'autres polluants sont susceptibles de devenir élevés lorsque la circulation transporte les masses d'air dans l'axe sud-ouest/nord-est. En milieu rural, les concentrations d'ozone au Québec ont été analysées par MALTAIS et ARCHAMBAULT (1985), LEDUC et GAGNON (1992) et ROBICHAUD (1993a). L'absence d'étude plus poussée, spécifiquement sur le milieu forestier du Québec, concernant les concentrations des contaminants à l'état gazeux (plus particulièrement l'ozone) est, en partie, à l'origine de la production du présent rapport.

## 2. – Méthode d'échantillonnage et d'analyse

### 2.1. Site d'échantillonnage

En 1987, un site d'échantillonnage a été installé en milieu forestier dans le bassin du lac Clair, dans les limites du territoire de la station forestière de Duschenay. Le site est situé à environ 35 kms au nord-ouest des limites de la ville de Québec, à une altitude d'environ de 320 m par rapport au niveau de la mer (figure 1). L'environnement du site est constitué d'une érablière à bouleaux jaunes composé de 80 % d'érables à sucre (*Acer saccharum*), 10 % de bouleaux jaunes (*Betula lutea*) et de 10 % de hêtres (*Fagus grandifolia*). Selon la classification climatique de Litynski, le site se caractérise par un climat subpolaire, subhumide, continental, sans saison sèche avec une insolation inférieure à la moyenne mondiale (PROULX *et al.*, 1987), avec des précipitations annuelles de l'ordre de 1 200 mm.

(1) Voir une excellente revue des effets de l'ozone sur la santé dans BATES (1989).

## 2.2. Instrumentation

Les prélèvements d'air sont faits au sommet d'une tour de 23 mètres de hauteur. La structure domine la forêt avoisinante d'environ 6 mètres. Ce type d'installation permet d'évaluer les concentrations des contaminants au-dessus du couvert forestier. La température, l'humidité relative, la vitesse et la direction des vents de même que la radiation solaire dans les longueurs d'ondes actives pour la photosynthèse sont aussi mesurées à partir du sommet de la tour. Le site de mesure est équipé d'un analyseur d'ozone de type Bendix, modèle 8002 : cet appareil utilise le principe de chimiluminescence à partir de la réaction en phase gazeuse sans flamme de l'éthylène avec l'ozone.

## 3. – Niveaux de l'ozone à Duschenay (1988-1991)

### 3.1. Bilan statistique des niveaux d'ozone (1988-1991)

Les informations recueillies depuis l'installation de la station de mesure de Duschenay nous permettent d'effectuer un bilan de quatre années d'opération (1988-1991) quant à l'échantillonnage de l'ozone. Quelques statistiques pertinentes sur les niveaux de ces contaminants sont présentées au tableau I sous forme de synthèse des résultats pour chaque mois de l'année. Les statistiques relatives aux niveaux des autres polluants gazeux échantillonnés (oxydes d'azote et dioxyde de soufre) montrent que les niveaux de ces polluants sont très faibles étant, dans une proportion de 50 % et plus, sous le seuil de détection (ROBICHAUD, 1993b).

Le tableau II présente une évolution de certains indices annuels d'exposition pertinents pour les quatre années de la période d'étude. Avant de procéder aux analyses, on définit les variables suivantes : SUM 06, ND 60, ND 80, 2ndHM et MAXH. La variable SUM 06 représente la somme cumulative de toutes les concentrations égales ou supérieures à 60 ppb et constitue un indice fiable de mesure de la dose d'ozone associée à des concentrations élevées. En effet, contrairement aux statistiques traditionnelles (telles que moyennes annuelles, moyennes saisonnières, nombre de dépassements des normes connues, 2ndHM, etc.), l'indice SUM 06 permet de caractériser les niveaux au site en termes d'exposition à moyen et long terme des végétaux (LEE *et al.*, 1991 ; TINGEY *et al.*, 1991). LEFOHN (1992) précise toutefois que l'ajout d'un percentile élevé combiné à l'indice SUM 06 permettrait de mieux caractériser les fortes concentrations d'ozone en vue de l'établissement d'une norme adéquate visant à protéger les écosystèmes. Ceci est lié au fait qu'un percentile élevé tiendra compte de la

# Analyse des niveaux d'ozone troposphérique à la station forestière de Duchesnay (Québec)

Figure 1.  
Localisation de la station de Duchesnay.  
Localization of Duchesnay's station.

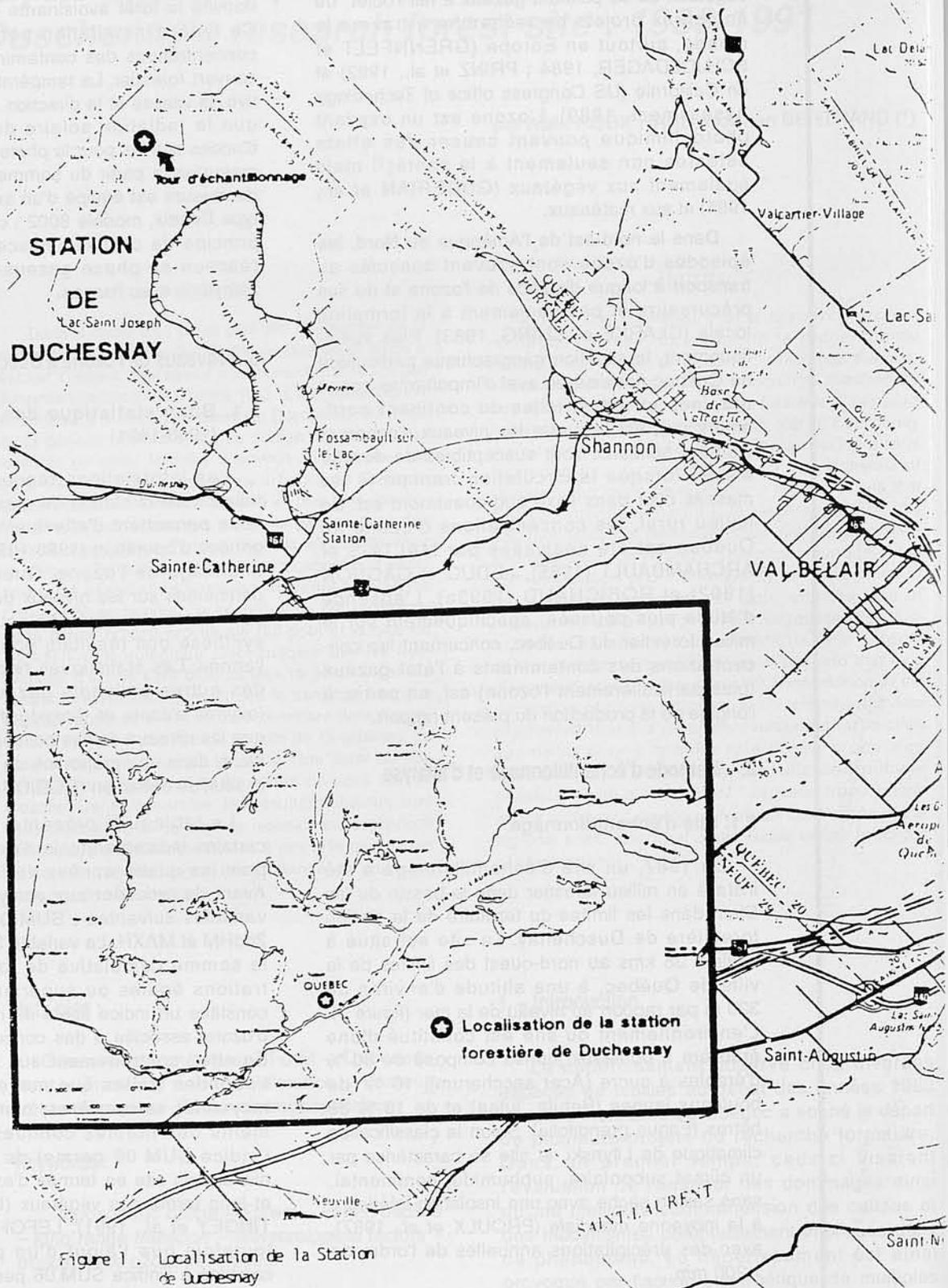


Figure 1. Localisation de la Station de Duchesnay

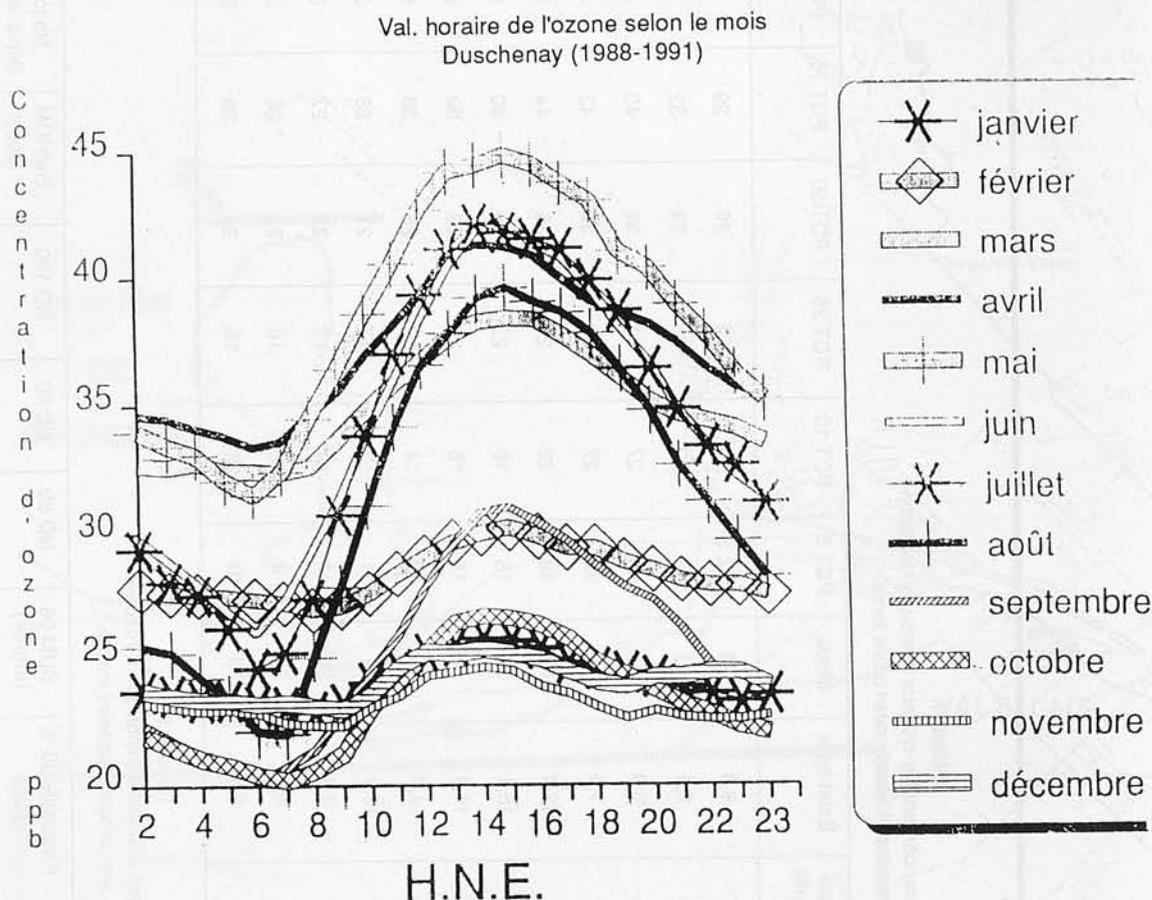
Tableau I.  
Statistiques concernant les niveaux mensuels de l'ozone.  
Statistics of monthly mean ozone levels.

	Heures manquantes	Taux de récupération	Valeur minimale horaire	Valeur maximale horaire	Moyenne mensuelle	Écart-type	Mode	PCT 5	PCT 10	PCT 25	PCT 50	PCT 75	PCT 90	PCT 95
Janvier	191	0,94	0	36	24,7	6,4	28	12	15	21	26	29	32	35
Février	141	0,95	3	42	28,6	5,4	31	19	22	26	29	32	35	36
Mars	278	0,91	9	80	35,5	6,9	37	25	27	31	36	40	43	58
Avril	195	0,93	13	81	37,3	7,9	37	25	27	32	37	42	47	58
Mai	236	0,92	9	87	37,1	12,0	38	19	22	29	36	44	53	63
Juin	275	0,90	3	106	33,2	15,1	26	16	18	23	30	40	52	47
Juillet	210	0,93	7	112	32,7	14,4	28	15	18	23	29	39	52	61
Août	163	0,95	0	91	29,8	14,7	22	12	14	19	26	38	51	59
Septembre	140	0,95	3	75	23,7	10,9	21	11	13	17	21	28	37	47
Octobre	209	0,93	1	71	22,6	8,3	26	11	13	17	22	27	32	37
Novembre	201	0,93	2	39	21,7	6,6	24	9	12	18	22	26	30	32
Décembre	140	0,95	0	34	22,8	6,8	30	10	13	18	24	28	31	32

Tableau II.  
Indices annuels d'exposition à l'ozone.  
Annual ozone exposure indices.

Année	Moyenne annuelle (ppb)	Mode (ppb)	Médiane (ppb)	Percentile 95 % (ppb)	Percentile 98 % (ppb)	SUM 06 (mm-hr)	ND 60	ND 80	ND 100	2ndHDM (ppb)	Nb jour de dépassement	MAXH (ppb)
1988	27,9	26	27	47	68	9,58	140	31	5	109	5	112
1989	31,2	31	30	53	68	9,85	168	26	0	93	8	99
1990	30,2	30	29	54	70	11,5	194	35	1	99	6	103
1991	27,1	22	26	46	61	4,99	87	10	1	100	4	103

Figure 2.  
Variation horaire des concentrations moyennes d'ozone (ppb) selon le mois de l'année.  
Hourly variation of mean ozone concentrations (ppb) against the month of year.



« queue » de la distribution de fréquence des concentrations horaires.

Les variables ND 60 et ND 80 représentent le nombre de dépassements horaires des niveaux 60 et 80 ppb respectivement et ont traditionnellement été utilisées, dans le passé, pour caractériser les niveaux d'ozone. La variable 2ndHM est définie comme étant la deuxième concentration horaire la plus élevée ayant été atteinte durant une année particulière. Cet indice est utilisé aux États-Unis comme norme à ne pas dépasser plus de trois fois par année. Finalement, MAXH représente le maximum horaire absolu enregistré durant l'année. A l'aide des indices présentés ci-haut, les tendances inter-annuelles peuvent être mises en évidence (tableau II). LEFOHN (1992) et LEE *et al.* (1991) rapportent que les indices 2ndHDM et MAXH, de même que les moyennes annuelles et estivales, ne peuvent pas rendre compte adéquatement des doses réelles à la végétation. En conséquence, au tableau II, on ne tiendra compte que des indices significatifs suivants : médiane, percentile 95 et 99, SUM 06 et ND 60. On note

alors que l'année 1991 montre des niveaux inférieurs de stress potentiel par l'ozone par rapport à ceux des autres années de la période d'étude. Inversement, l'année 1990 se caractérise par des niveaux plus élevés que les autres années.

Les statistiques du tableau II relèvent que les niveaux mesurés au site de Duschenay sont susceptibles de produire des dommages à la végétation. Cette conclusion est obtenue par la comparaison de l'indice SUM 06 calculé au tableau II avec les résultats du programme NCLAN<sup>(2)</sup> aux États-Unis. En effet, selon ces résultats, une valeur SUM 06 de l'ordre de 10 ppm-hr (tels qu'obtenus pour le site de Duschenay) produit une perte de rendement entre environ 0 et 10 % pour les espèces agricoles (TINGEY *et al.*, 1991). Par ailleurs, par comparaison avec les résultats présentés par CHAPPELKA et CHEVONE (1991), les niveaux mesurés à Duschenay (tels que montrés aux tableaux I et II) seraient susceptibles d'avoir un impact négatif significatif sur la santé et la

(2) NCLAN : National Crop Loss Assessment Network.

productivité de certaines espèces forestières, dont notamment l'érable à sucre.

### 3.2. Niveaux d'ozone en fonction de variables météorologiques locales

Afin de mieux caractériser les dommages potentiels à la végétation, il importe de connaître sous quelles conditions météorologiques, on observe des niveaux d'ozone élevés sur le site. La figure 3 montre le niveau moyen horaire d'ozone en fonction de la température et la vitesse du vent sous forme tridimensionnelle pour la période d'étude. On note que les concentrations moyennes horaires augmentent avec la température et la vitesse du vent. Pour une température élevée (supérieure à 25 deg. Celsius) et simultanément pour un vent supérieur à 25 km/h, les niveaux moyens d'ozone dépassent la norme horaire en vigueur (80 ppb). Les concentrations d'ozone élevées sont donc associées avec des températures élevées. D'autre part, un vent supérieur implique un mélange vertical par turbulence mécanique plus intense. Les moyennes horaires élevées d'ozone peuvent donc être aisément expliquées en termes de deux variables météorologiques simples à mesurer. On utilise ces deux variables explicatives dans l'établissement d'un modèle de régression multiple pour la concentration maximale journalière d'ozone pour le site de Duschenay dans ROBICHAUD (1993b).

Les variations de la radiation solaire combinées à la température ne présentent pas une réponse aussi simple sur les niveaux d'ozone que dans le cas précédent (figure 4). En effet, le niveau moyen d'ozone augmente avec l'ensoleillement lorsque la température est faible

(inférieure à 15 °C) alors que l'effet s'inverse à plus forte température (figure 4), de sorte que pour une température supérieure à 20 °C, les niveaux d'ozone diminuent lorsque l'ensoleillement augmente.

Figure 3.  
Concentrations moyennes d'ozone (ppb) versus température (degrés C) et vitesse du vent (km/h).  
Mean ozone concentrations (ppb) against temperature (°C) and windspeed (km/h).

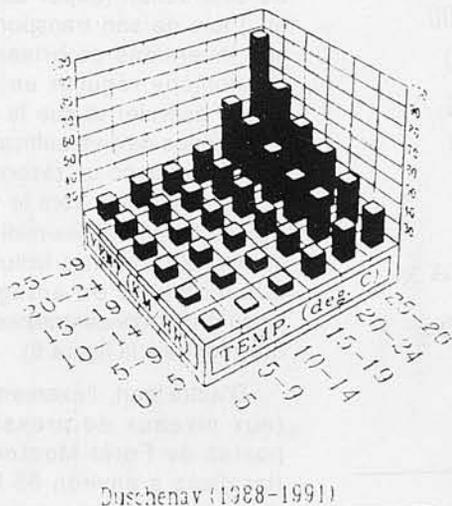
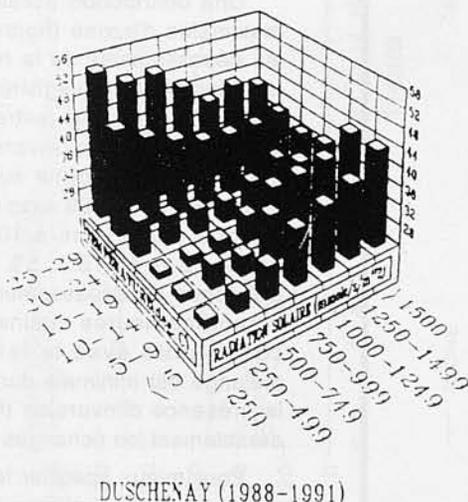


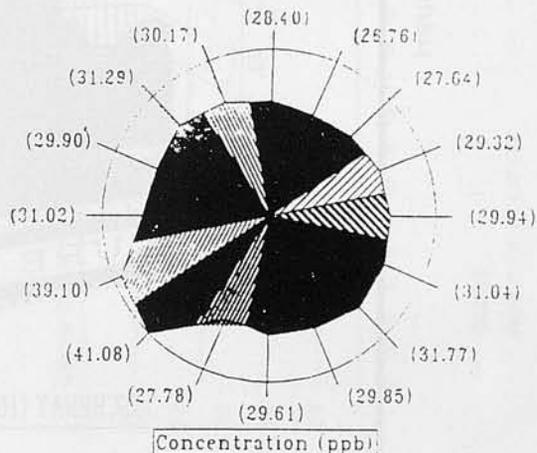
Figure 4.  
Concentrations moyennes d'ozone (ppb) versus la radiation solaire (mmole/s/m<sup>2</sup>) et la température (°C).  
Mean ozone concentrations (ppb) against solar radiation (mmole/s/m<sup>2</sup>) and temperature (°C).



### 3.3. Rose des concentrations d'ozone

Il est intéressant de déterminer la rose des concentrations d'ozone, c'est-à-dire les valeurs des niveaux d'ozone pour chaque secteur angulaire de la direction du vent. La figure 5

Figure 5.  
Rose des concentrations moyennes d'ozone (ppb) à Duschenay (1<sup>er</sup> avril-30 septembre 1991).  
Mean ozone concentrations rose (ppb) at Duschenay (1<sup>st</sup> April-30<sup>th</sup> September).



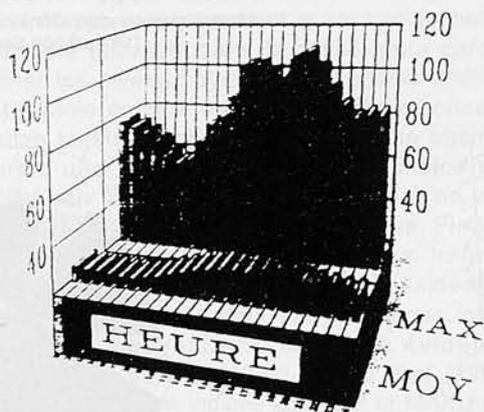
montre la concentration horaire moyenne d'ozone selon la direction du vent pour la période estivale de 1991 (1<sup>er</sup> avril-30 septembre). On note une concentration moyenne (41,08 ppb) qui atteint un maximum lorsque le vent souffle du secteur sud-ouest.

#### 4. - Analyse des épisodes de pollution par l'ozone

Une distribution horaire des concentrations maximales d'ozone (figure 6) nous montre que les dépassements de la norme horaire (80 ppb) n'ont jamais été enregistrés durant les premières heures de la journée (entre 2 h et 11 h 59) durant la période d'étude. Inversement, les dépassements de cette norme surviennent uniquement entre 12 h et 0 h 59 avec les plus hauts niveaux d'ozone (supérieurs à 100 ppb) se produisant entre 13 h et 15 h 59 et 17 h et 19 h 59. L'absence de dépassement de la norme horaire durant les heures matinales (2 h-11 h 59) est consistante avec le fait que la hauteur de mélange est minimale durant ces heures et que la présence d'inversion thermique limite considérablement les échanges gazeux verticaux.

Pour mieux spécifier le lien entre l'épaisseur de la couche de mélange, le « réservoir » d'ozone de la troposphère libre (situé au-dessus de la couche de mélange) et les niveaux d'ozone, on analysera de près l'évolution des variables météorologiques correspondant aux dates suivantes d'épisodes de pollution par l'ozone : 30 juillet 1988, 18 juillet 1989, 18 juillet 1990 et 27 juin 1991).

Figure 6.  
Concentration horaire moyenne et maximale d'ozone (ppb) selon l'heure.  
*Mean hourly and maximum ozone concentration (ppb) against time of the day.*



DUSCHENAY (1988-1991)

Les figures 7A à 7D reproduisent les variations horaires des variables météorologiques (température, humidité relative et vitesse du vent) enregistrées pour chacun des épisodes ainsi que la variation de la concentration d'ozone correspondante à chacune d'elle. L'examen des graphiques des différentes figures nous montre que les plus fortes concentrations sont enregistrées en après-midi et coïncident presque exactement avec les maximums de température et de vent ainsi qu'avec les minimums d'humidité relative. Le rabattement maximum des contaminants au sol coïncident avec la hauteur maximale de la couche de mélange et la température maximale. Ceci est en accord avec le modèle conceptuel d'un « réservoir régional » d'ozone dans la troposphère libre discuté par plusieurs auteurs (SINGH *et al.*, 1978 ; TOUPANCE, 1988 ; PROYOU *et al.*, 1991 ; ROBICHAUD et JACQUES, 1991). Une description schématique de ce concept est illustrée à la figure 8. Il s'agit simplement de considérer l'atmosphère libre (niveau de base environ 1 km d'altitude au-dessus du sol) comme agissant en tant que réservoir des contaminants gazeux. Celui-ci est, d'une part, alimenté naturellement par les intrusions stratosphériques (en grande partie, lors d'événement de replis de la tropopause ou durant les mouvements convectifs intenses) et, d'autre part, artificiellement par le transport à longue distance des précurseurs ainsi que de l'ozone. Dans des conditions habituelles, il forme un réservoir distinct ayant des concentrations moyennes maximales de l'ordre de 60 à 80 ppb entre 1 et 4 kms d'altitude (SINGH *et al.*, 1978) où d'une part l'inversion thermique stratosphérique empêche les échanges vers le haut et d'autre part les inversions thermiques fréquentes dans les bas niveaux limitent les échanges avec l'atmosphère comprise dans le premier kilomètre d'altitude. L'ozone produit par les zones industrielles en amont se trouve « piégé » au-dessus de ces inversions et découplés des mécanismes de destruction (dépôt au sol, oxydes d'azote, etc.) lors de son transport. Cependant, lorsque ces inversions se brisent complètement (un phénomène régulier en après-midi durant la saison estivale) et que le sommet de la couche de mélange devient suffisamment élevé pour être en contact avec ce réservoir, il y a rabattement des contaminants vers le sol. Cette situation est typique durant l'après-midi ou en début de soirée durant l'été sous nos latitudes et c'est également le moment où on enregistre les plus fortes valeurs des concentrations horaires d'ozone (tel que montré à la figure 6).

D'autre part, l'examen des rétro-trajectoires (aux niveaux de pression de 925 mb) aux postes de Forêt Montmorency et de Sutton (localisés à environ 65 kms au nord-est et à environ 220 kms au sud-est de Duschenay

Variations horaires des concentrations d'ozone (ppb) et des variables météorologiques standards pour certains épisodes.  
*Hourly variation of ozone concentration (ppb) and of standard meteorological variables for selected episodes.*

Figure 7A.  
 Épisode du 30 juillet 1988  
 Duschenay

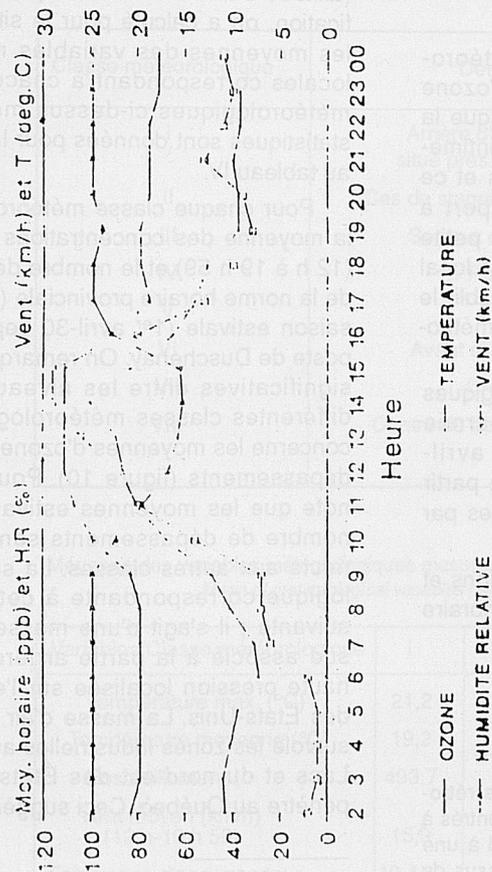


Figure 7B.  
 Épisode du 18 juillet 1989  
 Duschenay

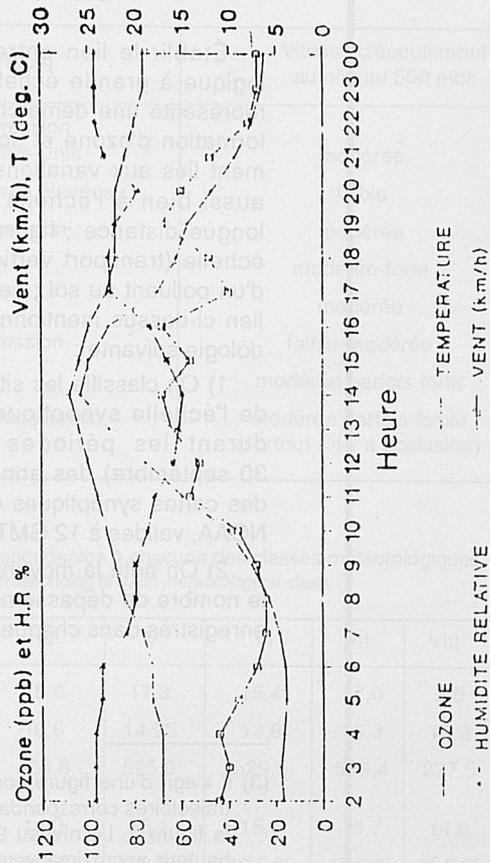


Figure 7C.  
 Épisode du 18 juillet 1990  
 Duschenay

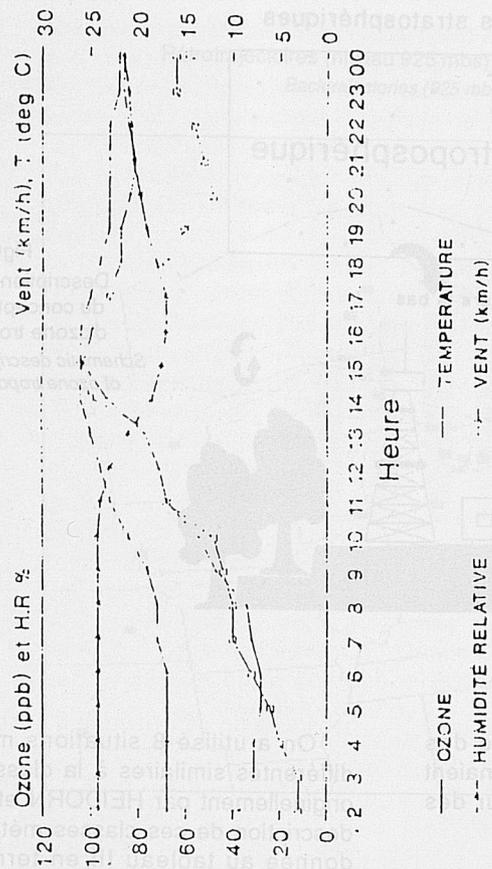
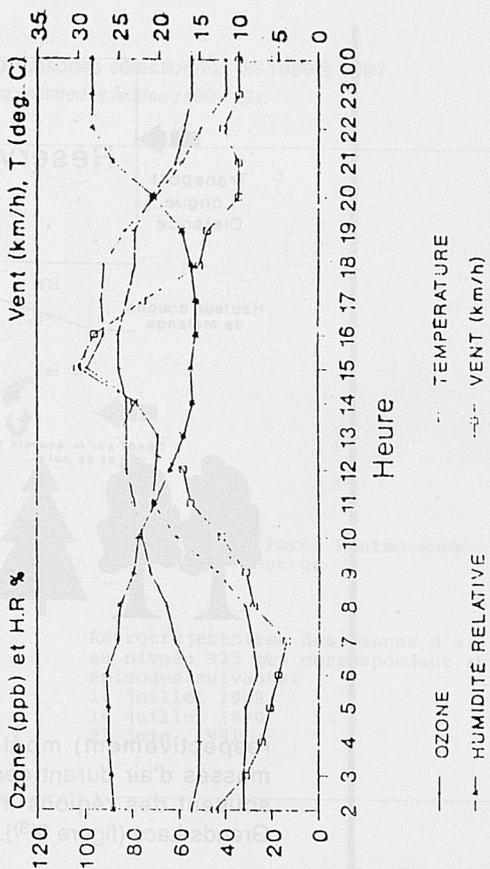


Figure 7D.  
 Épisode du 27 juin 1991  
 Duschenay



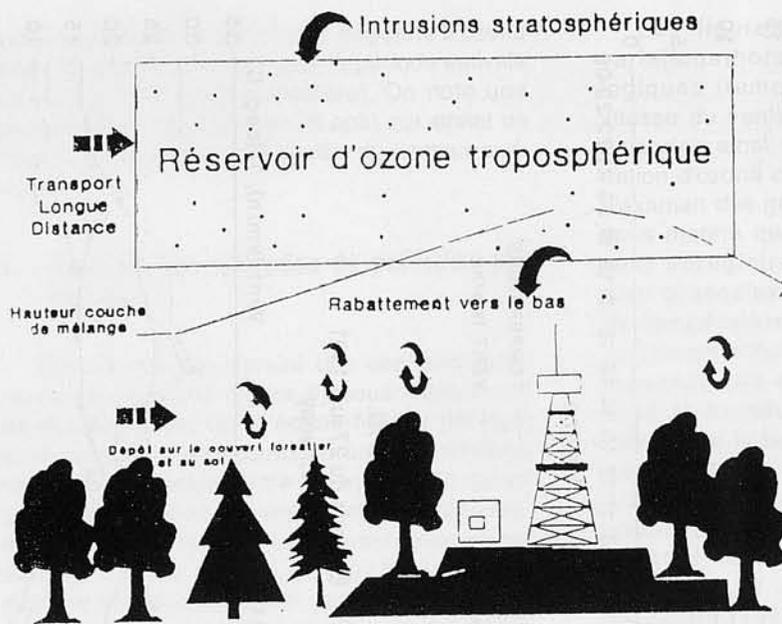


Figure 8.  
Description schématique  
du concept de réservoir  
d'ozone troposphérique.  
*Schematic description of the concept  
of ozone tropospheric reservoir.*

respectivement) montrent que l'origine des masses d'air durant ces épisodes provenaient souvent des régions industrielles autour des Grands Lacs (figure 9<sup>(3)</sup>).

## 5. - Niveaux d'ozone en fonction de la situation météorologique globale

Établir le lien entre la situation météorologique à grande échelle et le niveau d'ozone représente une démarche essentielle puisque la formation d'ozone et son transport sont intimement liés aux variations météorologiques et ce aussi bien à l'échelle régionale (transport à longue distance ; figures 5, 8 et 9) qu'à petite échelle (transport vertical et rabattement local d'un polluant au sol ; section 3.2). Pour établir le lien ci-dessus mentionné, on a utilisé la méthodologie suivante :

1) On classe les situations météorologiques de l'échelle synoptique pour chaque journée durant les périodes estivales (1<sup>er</sup> avril-30 septembre) des années 1988-1991, à partir des cartes synoptiques de surface (publiées par NOAA, valides à 12 GMT).

2) On note la moyenne des concentrations et le nombre de dépassements de la norme horaire enregistrés dans chaque classe.

(3) Il s'agit d'une figure composite de plusieurs rétro-trajectoires correspondants aux épisodes montrés à la figure 7. Le niveau 925 mbs correspond à une hauteur approximativement de 1 km au-dessus du niveau de la mer.

On a utilisé 8 situations météorologiques différentes similaires à la classification utilisée originellement par HEIDORN et YAP (1984). La description de ces classes météorologiques est donnée au tableau III en termes de patrons typiques à l'échelle synoptique<sup>(4)</sup> en surface et en altitude au niveau de pression de 500 mb (altitude d'environ 5 à 6 km). A des fins de vérification, on a calculé pour le site de Duschenay les moyennes des variables météorologiques locales correspondant à chacune des classes météorologiques ci-dessus mentionnées. Ces statistiques sont données pour la période d'étude au tableau IV.

Pour chaque classe météorologique, on note la moyenne des concentrations horaires diurnes (12 h à 19 h 59) et le nombre des dépassements de la norme horaire provinciale (80 ppb) durant la saison estivale (1<sup>er</sup> avril-30 septembre) pour le poste de Duschenay. On remarque des variations significatives entre les niveaux associés aux différentes classes météorologiques en ce qui concerne les moyennes d'ozone et du nombre de dépassements (figure 10). Pour la classe I, on note que les moyennes estivales diurnes et le nombre de dépassements sont, de loin, supérieurs aux autres classes. La situation météorologique correspondante à cette classe est la suivante ; il s'agit d'une masse d'air venant du sud associé à la partie arrière d'une zone de haute pression localisée sur l'extrême nord-est des États-Unis. La masse d'air associée a donc survolé les zones industrielles autour des Grands Lacs et du nord-est des États-Unis lorsqu'elle pénètre au Québec. Ceci suggère donc le résultat

(4) Échelle horizontale de l'ordre de 1 000 kms ou plus.

Figure 9.  
Rétrotrajectoires (niveau 925 mbs) correspondantes aux épisodes sélectionnés de 1989 à 1991.  
*Backtrajectories (925 mbs level) corresponding to selected episodes 1989-1991.*

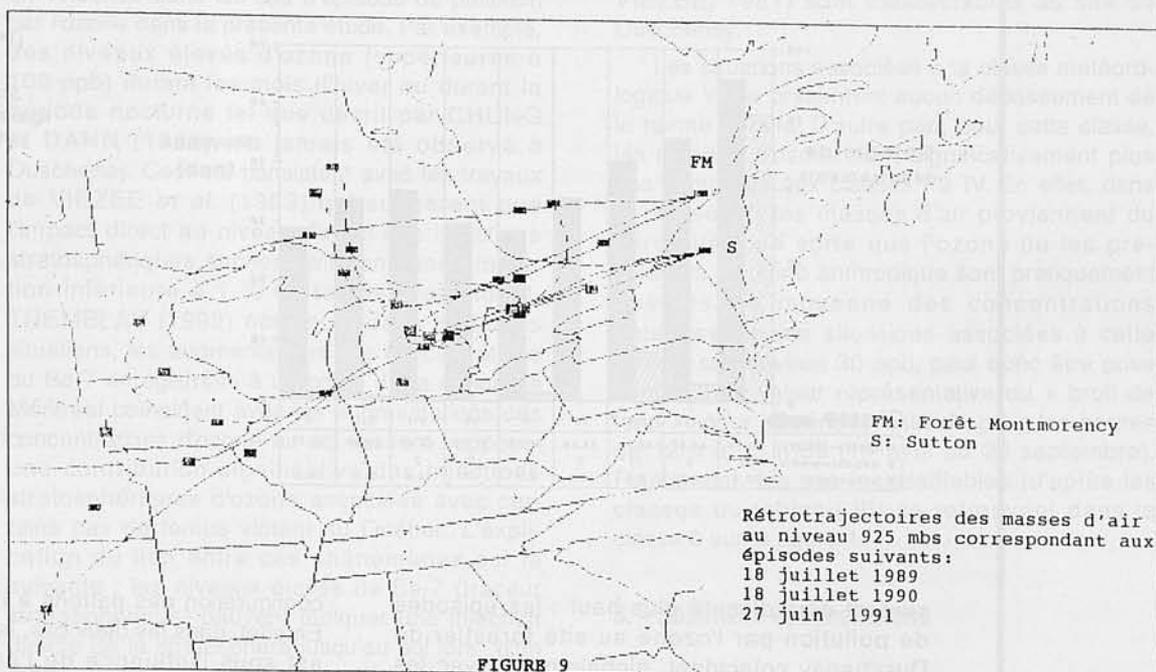


Tableau III.  
Caractéristiques typiques apparaissant sur les cartes météorologiques de surface et du niveau 500 mbs pour chacune des classes météorologiques  
*Typical characteristics associated on surface and 500 mbs level weather maps for each meteorological class.*

Classe météorologique	Description (carte de surface)	Vitesse d'écoulement au niveau 500 mbs
I	Arrière d'une zone de haute pression situé près de la côte est des États-Unis	modérée
II	Cas de stagnation avec températures élevées	faible
III	Secteur chaud d'une basse pression	modérée
IV	Passage d'un front froid	modérée-forte
V	Arrière d'un front froid	modérée
VI	Avant d'une zone de haute pression	faible-modérée
VII	Crête de haute pression	modérée parfois forte
VIII	Centre de basse pression avec précipitation	modérée parfois faible (surtout s'il y a occlusion)

Tableau IV.  
Moyenne des variables météorologiques mesurées à Duschenay correspondantes à chacune des classes météorologiques.  
*Mean of meteorological variables measured at Duschenay corresponding to each meteorological class.*

Variabes/Classe météorologique	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Température max. (°C)	21,2	22,1	16,1	18,8	17,3	15,4	17,0	2,5
Température moyenne (°C)	19,2	20,2	14,9	16,6	14,95	13,9	15,3	10,2
Ensoleillement ( )	493,7	644,7	267,1	438,8	525,0	529,5	599,4	227,5
Vent moyen (km/h) (12 h-19 h 59)	15,9	14,4	14,4	14,0	15,1	15,6	13,7	14,8
Fréquence d'occurrence	10,4 %	7,9 %	8,2 %	12,3 %	8,9 %	10,0 %	15,6 %	11,5 %

Concentrations moyennes d'ozone selon la classe météo  
Duschenay (avril-septembre 1988-1991)  
■ Moy. (12 h-19 h 59) ▨ dépassemnts

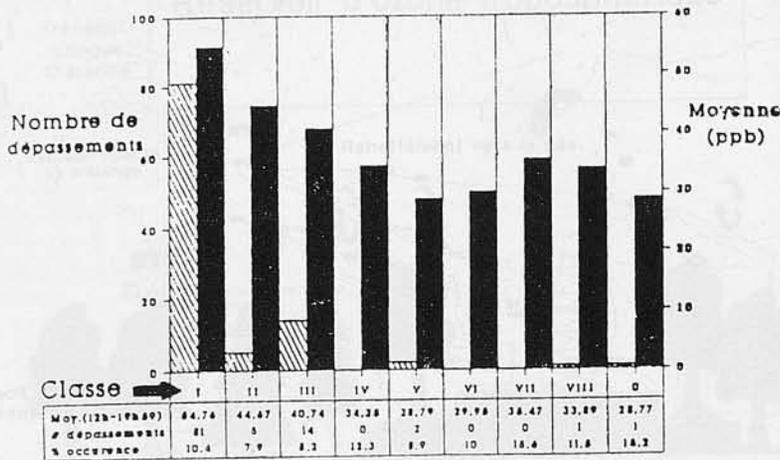


Figure 10.  
Statistiques  
des niveaux d'ozone  
selon la classe  
météorologique  
(1<sup>er</sup> avril-30 septembre  
1988-1991).  
Statistics of ozone levels  
against the meteorological class  
(1<sup>st</sup> April-30<sup>th</sup> September).

suivant déjà discuté plus haut : les épisodes de pollution par l'ozone au site forestier de Duschenay coïncident, globalement, avec les modèles météorologiques à l'échelle synoptique. Ceci est en accord avec l'occurrence synchrone des épisodes d'ozone notée aux sites d'un réseau à l'échelle du Québec méridional (ROBICHAUD et JACQUES, 1991). En résumé, la figure 10 suggère que les fluctuations des niveaux d'ozone en milieu rural au Québec sont largement déterminées par les variations météorologiques. D'abord à l'échelle régionale, les fluctuations des concentrations du réservoir troposphérique, sont associées au changement du type de classe météorologique alors qu'au niveau du sol, les fluctuations d'ozone suivent des cycles diurnes similaires aux variables météorologiques telles que température, vitesse et direction du vent (figures 7A à 7D).

Les concentrations moyennes d'ozone pour les classes II et III (figure 10) présentent également des niveaux élevés bien que le nombre de dépassements soit nettement inférieur à celui de la classe I. Dans la classe II, la masse d'air a tendance à être stagnante (vitesse de l'écoulement faible en altitude, voir description au tableau IV). Cependant, elle possède toutes les caractéristiques d'une masse d'air venant au sud puisque les températures moyennes et maximales enregistrées à Duschenay sous cette classe sont les plus fortes parmi toutes les autres classes. Même si cette masse d'air possède une tendance à la stagnation lorsqu'elle se présente sur le territoire québécois, elle a préalablement survolé les régions industrielles autour des Grands Lacs. Ceci explique les niveaux moyens relativement élevés dans ce cas. La classe III présente une similarité avec la classe I du point de vue de la

configuration des patrons à l'échelle synoptique. En effet, dans les deux cas, le Québec méridional est sous l'influence de l'arrière d'une haute pression sur la côte Atlantique avec un système dépressionnaire s'approchant du sud-ouest. Cependant, dans la classe III, la zone dépressionnaire a beaucoup plus d'influence que dans la classe I (à cause d'une plus grande proximité de celle-ci). Cependant, l'enneigement plus grand et la précipitation occasionnelle sous forme d'averses préfrontales associé à la présence d'un système dépressionnaire s'approchant sur le Québec méridional, implique un ensoleillement limité et par conséquent un régime de température moins élevé le long de la trajectoire empruntée par les polluants lors du transport à longue distance, ce qui se traduit par des niveaux d'ozone moins élevés dans la troposphère libre et éventuellement au sol au site étudié.

Les systèmes météorologiques amenant des masses d'air de l'ouest ou du nord-est (classes météorologiques V, VI et VII) ont des niveaux d'ozone plus faibles et des fréquences de dépassements relativement basses en dépit des conditions de ciel dégagé et de fort ensoleillement souvent associés à ces classes (voir moyenne de l'ensoleillement à Duschenay pour chaque classe ; tableau IV). Ces résultats montrent le lien important existant entre la situation météorologique et les niveaux d'ozone au Québec. Ils suggèrent également qu'un ensoleillement élevé (comme c'est très souvent le cas pour une masse d'air s'amenant derrière les fronts froids) n'est pas suffisant pour créer des épisodes d'ozone et que la présence de masses d'air apportant des polluants des zones industrialisées est essentielle. Des conclusions similaires ont été obtenues par CHUNG (1977) pour l'Ontario et par CLARKE et CHING (1983)

pour le nord-est des États-Unis. Quant au rôle des injections stratosphériques provenant directement de la stratosphère, il n'a pu être mis en évidence dans les cas d'épisode de pollution par l'ozone dans la présente étude. Par exemple, des niveaux élevés d'ozone (supérieures à 100 ppb) durant les mois d'hiver ou durant la période nocturne tel que décrit par CHUNG et DANN (1983) n'a jamais été observé à Duschenay. Ceci est consistant avec les travaux de VIEZEE *et al.* (1983) qui suggèrent que l'impact direct au niveau du sol des injections stratosphériques surviendrait dans une proportion inférieure à 1 % du temps. Cependant, TREMBLAY (1992) note que, dans certaines situations, les augmentations des concentrations du Be-7 enregistrées à un poste de la région de Montréal coïncident avec les augmentations des concentrations d'ozone au sol laissant supposer une contribution significative des injections stratosphériques d'ozone associées avec certains cas de temps violent au Québec. L'explication du lien entre ces phénomènes est la suivante : les niveaux élevés de Be-7 (traceur stratosphérique) peuvent indiquer une injection directe de la stratosphère jusqu'au sol lors d'un mouvement descendant associé à des nuages convectifs à grande extension verticale (cumulonimbus) dont le sommet a pénétré la stratosphère. Notons cependant, que l'applicabilité du Be-7 en tant que traceur est un sujet de controverse (SINGH *et al.*, 1980 ; DUTKIEWICZ et HUSAIN, 1985).

Les cas associés à des systèmes dépressionnaires avec ciel couvert et précipitation continue sont ceux de la classe VIII. Durant la saison estivale, la grande majorité de ces systèmes survolent la région des Grands Lacs et du Mid-West américain et transportent les produits de l'activité humaine de ces régions fortement industrialisées. Ce sont ces situations météorologiques qui sont généralement associées au phénomène des pluies acides (BOULET et PINARD, 1992). Par contre, dans le cas de l'ozone, ces mêmes systèmes ne sont responsables que de très peu de dépassements de la norme horaire et les niveaux d'ozone sont plutôt à la baisse dans les situations de système dépressionnaire (classe VIII, figure 14). En effet, la transformation des précurseurs d'ozone tels que les  $\text{NO}_x$  en acide nitrique et la transformation de l'ozone par les précipitations (via les radicaux OH $\cdot$  ; voir LEGGE et KRUPA, 1989) font en sorte que les niveaux d'ozone sont réduits lorsque le système dépressionnaire atteint le sud du Québec. Les moyennes les plus basses se retrouvent dans la classe V associées à une situation de passage frontal. Seulement deux dépassement de la norme horaire ont été enregistrés en quatre années dans de telles situations, suggérant que l'impact au sol au niveau des concentrations d'ozone par les

mouvements subsidants d'air stratosphérique au moment des passages frontaux tels que rapportés dans la littérature (JOHNSON et VIEZEE, 1981) sont indétectables au site de Duschenay.

Les situations associées à la classe météorologique VI ne présentent aucun dépassement de la norme horaire. D'autre part, pour cette classe, les niveaux d'ozone sont significativement plus bas comparés aux classes I à IV. En effet, dans la classe VI, les masses d'air proviennent du nord-ouest de sorte que l'ozone ou les précurseurs d'origine anthropique sont pratiquement absents. La moyenne des concentrations obtenues par les situations associées à cette classe, soit environ 30 ppb, peut donc être prise comme une valeur représentative du « bruit de fond », pour la période estivale pour les heures de 12 h à 19 h 59 (1<sup>er</sup> avril au 30 septembre). Finalement, les cas inclassifiables (d'après les classes du tableau III) se retrouvent dans la classe 0 sur la figure 14.

## 6. – Sommaire et conclusions

1) Les niveaux d'ozone mesurés à la station de Duschenay peuvent être considérés comme étant potentiellement néfastes à la végétation. Les indices d'exposition calculés pour ce site ont un impact significatif sur certaines espèces lorsque comparés aux résultats d'études effectuées en conditions contrôlées.

2) L'influence du transport à longue distance est prédominante sur la production d'épisodes d'ozone à Duschenay. Ceci est consistant avec plusieurs études réalisées dans le passé (HEINDORN et YAP (1984) pour l'Ontario ; CLARKE et CHING (1983) pour le nord-est des États-Unis ; SCHJOLDAGER (1981) pour la Norvège ; ROBICHAUD (1993a) pour le Québec).

3) Production photochimique locale. C'est pour des régimes de température élevées (supérieures à 20 °C) que l'on note les plus hautes concentrations d'ozone (voir figures 3 et 7). Or, d'après la figure 4, les concentrations moyennes d'ozone diminuent avec l'ensoleillement<sup>(5)</sup>. De plus, les concentrations de dioxyde

(5) L'ensoleillement mesuré à Duschenay est dans la bande active pour la photosynthèse (400-700 nm). Les longueurs d'ondes actives pour l'activité photochimique sont inférieures à 400 nm. Cependant, on suppose ici que l'intensité de l'activité photosynthétique est représentative de l'intensité de l'ensemble du spectre solaire et également de l'intensité des longueurs d'onde dans l'ultra-violet. Notons que cette hypothèse est cependant discutable dans le cas de certaines situations telle que la présence de nuages avec grande extension verticale.

d'azote (principal précurseur de l'ozone) sont très faibles (voir section 3.1). Finalement, le coefficient de corrélation entre l'altitude des sites du réseau REMPFAQ<sup>(6)</sup> et la moyenne annuelle est élevé ( $R = 0,88$  ;  $p < 0,001$ ) indiquant que la « source » des contaminants provient de la « troposphère libre » plutôt que du sol (ROBICHAUD, 1993b). Par conséquent, ces arguments suggèrent que la production photochimique locale ne semble pas jouer un rôle important au site de Duschenay dans la génération d'épisodes de pollution par l'ozone<sup>(7)</sup>.

4) Il existe une forte association entre les moyennes estivales (1<sup>er</sup> avril-30 septembre), la fréquence de dépassements de la norme provinciale et le type de situation météorologique. Ceci suggère que les fluctuations d'ozone sont déterminées largement par les variations météorologiques.

5) Les analyses et observations décrites dans les sections précédentes appuient le concept simple de « réservoir régional » d'ozone. En effet, celui-ci représente la troposphère libre au-dessus des régions rurales du Québec méridional et ayant des concentrations qui fluctuent peu dans le plan horizontal à l'intérieur de ses limites (sur une distance de 100 à 500 kms). Ce concept permet de concilier et d'expliquer plus facilement la grande majorité des observations présentées dans le présent rapport et lors d'études précédentes. Un lien est évident entre la hauteur de la couche de mélange et les niveaux d'ozone. En effet, la hauteur de mélange maximale se produit généralement, en après-midi, lorsque les températures sont maximales, expliquant l'heure à laquelle se produisent les niveaux d'ozone les plus élevés (c'est-à-dire vers 15 à 16 h, voir figure 2). Cependant, la nature quantitative de ce lien reste à préciser lors d'études ultérieures.

### Remerciements

L'auteur désire remercier Mesdames Hélène MARQUIS et Marie-Odile COTÉ qui ont travaillé ardemment au travail de collecte, d'entretien et d'une grande partie de la validation des données. Nous tenons également à remercier M. Ibrahim DOUKOURÉ pour sa collaboration relative au

dépannage informatique et de son implication au niveau de la programmation du système d'archivage de la banque de données. Finalement, des remerciements sont adressés à M. Gilles MORNEAU d'Environnement Canada, pour nous avoir fourni les données nécessaires à l'affichage graphique des rétrotrajectoires et à M. Pierre VAILLANCOURT pour la modification du programme d'affichage. La présente étude est financée, en partie, par la Direction de la recherche du ministère des Forêts.

### 9. - Références

- BATES D. V. Review, Ozone - Myth and Reality. *Environmental Research*, 1989, 50, 230-237.
- BONNEAU M. Que sait-on maintenant des causes du dépérissement des forêts ? *Rev. For. Fr.* XLI, 1989, 5, 367-385.
- BOULET G. et PINARD P. Les précipitations acides au Québec. Bilan des années 1981 à 1991. *Le Climat*, mai 1992, 10, 1, 9-25.
- CHAPPELKA A. H., CHEVONE B. I. Tree responses to ozone. Dans « Surface level ozone exposures and their effects on vegetation. Allen Lefohn éditeurs. Lewis Publishers, 1991, chapitre 7.
- CHUNG Y. S. Ground-level ozone and regional transport of air pollutants. *Journal of Applied Met.*, 1977, 16, 11, 1127-1136.
- CHUNG Y. S., DANN T. Observations of stratospheric ozone at the ground level in Regina, Canada. *Atmos. Env.*, 1973, 17, 1703-1712.
- CLARKE J. F., CHING J. K. S. Aircraft observations of regional transport of ozone in the Northeastern United States. *Atmos. Env.*, 1983, 17, 1703-1712.
- CHEVONE B. I. et LINZON S. N. Tree Decline in North America. *Environ. Pollut.*, 1988, 50, 87-99.
- DUTKIEWICZ V. A., HUSAIN L. Stratospheric and tropospheric components of Be-7 in surface air. *J. of Geophys. Res.*, 1985, 90, 5783-5788.
- GRENNFELT P., SCHJOLDAGER J. Photochemical oxidants in the troposphere, a mounting menace. *Ambio.*, 1984, 13, 2, 61-67.
- GUDERIAN R., TINGEY D. T., BATE R. Effects of photochemical oxidants on plants. Dans « Air pollution by photochemical oxidants ». *Ecological Studies* 52. Edited by R. Guderian, Springer-Verlag, 1985.
- HEIDORN K. C., YAP D. A synoptic climatology for ozone in Southern Ontario, 1976-1981. Ministry of the Environment Ontario. Air Quality and Meteorology Section. Air Resources Branch, 1984.
- JOHNSON W. B., VIEZEE W. Stratospheric ozone in the lower troposphere. Presentation and interpretation of aircraft measurements. *Atmospheric Env.*, 1981, 15, 1309-1323.
- LEDUC R., GAGNON G. La pollution par l'ozone au Québec. Dans : La pollution par l'ozone au Québec ; aspects de la problématique. Ministère de l'Environnement du Québec, 1992, 15-39.
- LEE E. H., HOGSETT W. E., TINGEY D. T. Efficacy of ozone exposure indices in the standard setting process dans *Tropospheric Ozone and The Environ-*

(6) REMPFAQ : Réseau de mesure des polluants atmosphériques en milieu forestier et agricole.

(7) Un résultat consistant avec cette conclusion est celui obtenu à la figure 7A de ROBICHAUD et JACQUES (1991) qui montre que les concentrations moyennes d'ozone en après-midi durant l'été sont pratiquement identiques à plusieurs stations d'un réseau ayant des types de végétation différents (terres agricoles, forêt, région de montagnes et de forêts).

- ment. Édité par R. Berglund, D. R. Lawson, D. J. McKee. Air and Waste Manag. Assoc., Pittsburgh, 1991, 256-271.
- LEFOHN A. S. Communication personnelle, septembre 1992.
  - LEGGE A. H., KRUPA S. V. Acidic deposition : Sulphur and nitrogen oxides. Chap. 3. The Alberta Government/industry acid deposition research program (ADRP). Lewis Publishers, 1989.
  - MALTAIS B., ARCHAMBAULT D. Mesures et dommages de l'ozone (O<sub>3</sub>) dans la région métropolitaine de Montréal. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 1985.
  - PRINZ B., KRAUSE G. H. M., STRATMAN H. Forest damage in the Federal Republic of Germany, LIS report No. 28, Land Institute for Pollution Control (CEGB Translation No. T 14240), 1982.
  - PROULX H., JACQUES G., LAMOTHE A. M., LITYNSKI J. Climatologie du Québec méridional. Ministère de l'Environnement du Québec, 1987.
  - PROYOU A. G., TOUPANCE G., PERROS P. E. A two-year study of ozone behaviour at rural and forested sites in Eastern France. *Atmos. Environ.*, 25A, 1991, 10, 2145-2153.
  - ROBICHAUD A., JACQUES G. Concentrations d'ozone en milieu extra-urbain au Québec en 1989 et 1990. Rapport interne, Direction des réseaux atmosphériques, ministère de l'Environnement, M-91-15, novembre 1991.
  - ROBICHAUD A. a) Concentrations d'ozone stratosphérique sur le Québec méridional durant la période 1989-1991. *Le Climat*, mai 1993, 11 (1), 7-40.
  - ROBICHAUD A. b) Analysis of levels of gas pollutants and dry deposition rates at a forest research site near Quebec city : 1988-1991. Exposé scientifique présenté au 27<sup>e</sup> Congrès annuel de la Société canadienne de météorologie et d'océanographie (SCMO), Frédéricton, NB, 8-11 juin 1993.
  - SCHJOLDAGER J. Ambient ozone measurements in Norway, 1975-1979. *J. of the Air Pollut. Control. Assoc.*, 1981, 31, 1187-1190.
  - SMITH W. H. Air Pollution and Forests. Interactions between Air Contaminants and Forest Ecosystems. Springer-Verlag, 1980, 618 p.
  - TINGEY D., HOGSETT W. E., LEE E. H., HERSTROM A. A., AZEVEDO S. H. An evaluation of various alternative ambient ozone standards based on crop yield loss data dans Tropospheric Ozone and The Environment. Édité par R. Berglund, D. R. Lawson, D. J. McKee. *Air and Waste Manag. Assoc.*, 1991, 272-288.
  - TOUPANCE G. L'ozone dans la basse stratosphère. Théorie et pratique. *Pollution Atmosphérique*, janvier-mars 1988, 32-42.
  - TREMBLAY J. Services scientifiques, Environnement Canada. Communication personnelle, 1992.
  - US Congress Office of Technology Assessment, Catching our breath : Next steps for reducing urban ozone, OTA-0-412, Washington, DC : US Government Printing Office, juillet 1989.
  - VIEZEE W., JOHNSON W. B., SINGH H. B. Stratospheric ozone in the lower troposphere, II. Assessment of downward flux and ground-level impact. *Atmos. Environ.*, 1983, 17.