

Qualité de l'air dans la région de Porto

Analyse comparative

Air quality in Oporto area *Comparative analysis*

M. C. ALVIM FERRAZ (*) et C. A. ALVES (**)

RÉSUMÉ

A partir de 1986-1987, on observe une tendance irrégulière de l'augmentation des concentrations moyennes mensuelles d'acidité forte et fumées noires. Les concentrations correspondant aux jours de la semaine sont supérieures à celles obtenues les week-ends et jours fériés, lesquelles mettent en évidence l'apport de l'activité industrielle et du trafic. Aucune corrélation mathématique significative traduisant l'évolution croissante des concentrations moyennes annuelles n'a été mise en évidence. Dans les stations les plus représentatives, les valeurs guides ont été dépassées, les concentrations étant proches de la limite. Bien que nous n'ayons pas enregistré d'épisodes aigus de pollution, l'évolution vérifiée durant la période prise en compte traduit un aggrave-ment de la qualité de l'air. Cette tendance à la hausse est contraire à celle observée dans d'autres pays, où les niveaux d'acidité forte et fumées noires tendent à baisser grâce aux mesures de protection de l'environnement mises en pratique. Les niveaux de monoxyde de carbone, d'oxydes d'azote et d'ozone, observés en 1992 sont plus bas que dans d'autres régions.

ABSTRACT

It was recorded an irregular trend upward for strong acidity and black smoke average monthly concentrations since 1986-1987. Levels in the working days are higher than those monitored in the week-end and days off, which proves the effect of traffic and industrial activities on air quality. It was not possible to establish any overall correlation liable to express the increase in annual average concentrations. At the most representative stations, the exceedance of guideline values was recorded and concentrations reached values close to the limit. No acute episodes of air pollution were recorded, although the trend patterns monitored show an aggravation of air quality during this period of time. This trend is contrary to the one derived in foreign networks, where strong acidity and black smoke levels have been decreasing in consequence of environmental protection measures put into practice. Carbon monoxide, nitrogen oxides and ozone levels measured in 1992 are lower when compared with those monitored in other regions.

1. Introduction

La pollution atmosphérique constitue un motif de préoccupation croissante pour la plupart des populations. En particulier, les agglomérations urbaines sont gravement atteintes par la dégradation de la qualité de l'air, avec comme causes principales : le trafic automobile, les industries et le chauffage domestique. De nombreuses incertitudes demeurent encore sur la relation dose-réponse des polluants concernant les maladies respiratoires et la santé publique en général. Les polluants dispersés dilués dans l'atmosphère sont physiquement transformés par des mécanismes tels que l'absorption, la dissolution ou (coalescence) Ces der-

niers peuvent encore être convertis à travers des réactions chimiques entre polluants ou entre ceux-ci et le milieu [1]. Il est donc convenable d'analyser la nature qualitative et quantitative de la pollution atmosphérique et de suivre l'évolution des principaux polluants. Si nous considérons que l'homme respire quotidiennement 10 à 15 m³, ou soit environ 300 000 m³ au long de toute une vie [2], le contrôle de la qualité de l'air se justifie parfaitement.

Dans la région de Porto, les premières estimations de la qualité de l'air ont été effectuées en 1968 à partir de l'installation d'un réseau de mesure pour la raffinerie de Petrolgal. La gestion de neuf stations de ce réseau, où on déterminait quotidiennement des moyennes d'acidité forte (AF) et fumées noires (FN), a été placée après le mois de mars 1968 sous la responsabilité de la CGA-AP (Commission de Gestion de l'Air dans la région de Porto) qui n'est plus en activité depuis 1993.

(*) *Departamento de Engenharia Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, R. dos Bragas 4099 Porto Cedex Portugal.*

(**) *Departamento de Engenharia Biológica, Universidade do Minho Gualtar 4719 Braga Codex Portugal.*

La région de Porto est caractérisée par des zones résidentielles limitrophes du centre ville et par une localisation dispersée et sans organisation de petites et moyennes entreprises qui pratiquent des activités industrielles. On suppose que les émissions des plus grandes industries localisées à Motosinhos (où se situe « Petrogal ») atteignent la ville de Porto. Dans la zone commerciale, plus ancienne, les principales émissions sont dues au trafic automobile. Compte tenu des facteurs géographiques et climatiques particuliers et des caractéristiques d'organisation du centre urbain, avec des rues étroites et des constructions de hauteur significative, on peut affirmer que la dispersion des polluants est difficile [3].

Conséquence de la législation qui y a été imposée, une nette tendance à la diminution des ni-

veaux de certains polluants se manifeste dans la plus grande partie de la Communauté Européenne et en Amérique du Nord. L'exploitation des résultats de mesures recueillis dans les stations à l'étranger a servi de support pour comparer l'évolution de la qualité de l'air à Porto et de sa région.

2. Matériels et méthodes

2.1. Dispositif de surveillance de la qualité de l'air

Les stations de mesure représentées dans la figure 1 se situent dans la ville de Porto ou dans des communes limitrophes. Le tableau I présente la localisation détaillée et les principales caractéristiques de plusieurs stations de mesures. Dans ce

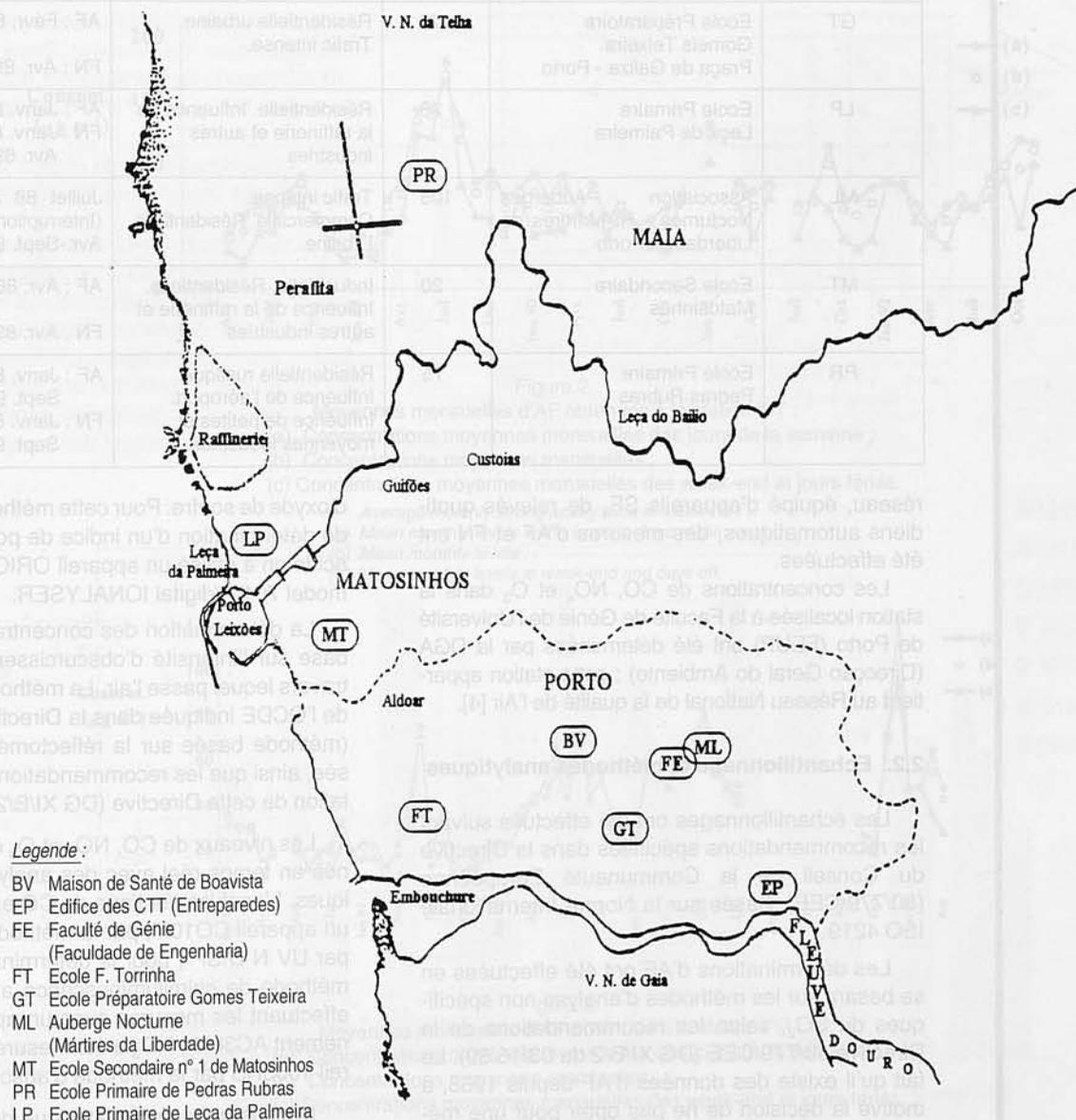


Figure 1.
Localisation des stations de mesures d'AF et FN.
Localization of air pollution monitoring stations.

Tableau I.
Caractéristiques du dispositif de surveillance de la qualité de l'air (CGA-AP).
Characterization of air quality network in Oporto area.

Désignation de la station	Localisation	Altitude (m)	Type de zone	Période de fonctionnement
BV	Maison de Santé de Boavista - Porto	85	Résidentielle. Trafic intense. Influence de la station centrale des STCP (Transports collectifs).	AF : Janv. 86 - Déc. 92 FN : Janv. 86 - Mars 87 Mars 89 - Déc. 92
EP	Edifice des CTT R. de Entreparedes - Porto	90	Résidentielle. Commerciale. Urbaine. Trafic intense.	Décembre 88 à Août 90
FE	Faculdade de Eng. R. dos Bragas - Porto	85	Résidentielle. Trafic intense. Influence de petites industries.	Janvier à Décembre 92
FT	Ecole F. Torrinha R. Francisco Xavier - Porto	40	Résidentielle.	AF : Janv. 86 - Mars 87 Févr. 89 - Avr. 91 FN : Janv. 86 - Mars 87 Avr. 89 - Avr. 91
GT	Ecole Préparatoire Gomeis Teixeira Praça de Galiza - Porto	78	Résidentielle urbaine. Trafic intense.	AF : Févr. 89 - Déc. 92 FN : Avr. 89 - Déc. 92
LP	Ecole Primaire Leça de Palmeira	28	Résidentielle. Influence de la raffinerie et autres industries	AF : Janv. 86 - Déc. 92 FN : Janv. 86 - Mars 87 Avr. 89 - Déc. 92
ML	Association Auberges Nocturnes - R. Mártires da Liberdade - Porto	105	Trafic intense. Commerciale. Résidentielle. Urbaine.	Juillet 88 à Décembre 91 (Interruptions : Mai-Sept. 89 ; Avr.-Sept. 90)
MT	Ecole Secondaire Matosinhos	20	Industrielle. Résidentielle. Influence de la raffinerie et autres industries	AF : Avr. 86 - Déc. 92 FN : Avr. 89 - Déc. 92
PR	Ecole Primaire Pedras Rubras	75	Résidentielle rustique. Influence de l'aéroport. Influence de petites et moyennes industries.	AF : Janv. 86 - Oct. 89 Sept. 90 - Avr. 91 FN : Janv. 86 - Mars 87 Sept. 90 - Avr. 91

réseau, équipé d'appareils SF₈ de relevés quotidiens automatiques, des mesures d'AF et FN ont été effectuées.

Les concentrations de CO, NO_x et O₃ dans la station localisée à la Faculté de Génie de l'Université de Porto (FEUP) ont été déterminées par la DGA (Direcção Geral do Ambiente) ; cette station appartient au Réseau National de la qualité de l'Air [4].

2.2. Echantillonnage et méthodes analytiques

Les échantillonnages ont été effectués suivant les recommandations spécifiées dans la Directive du Conseil de la Communauté Européenne (80/779/CEE), basée sur la Norme Internationale ISO 4219.

Les déterminations d'AF ont été effectuées en se basant sur les méthodes d'analyse non spécifiques du SO₂, selon les recommandations de la Directive 80/779/CEE (DG XI/B/2 du 03/16/89). Le fait qu'il existe des données d'AF depuis 1968, a motivé la décision de ne pas opter pour une méthode spécifique de dioxyde de soufre. La méthode à l'eau oxygénée utilisée s'appuie sur la norme ISO/DIS-7220 (1982), exprimant les résultats en

dioxyde de soufre. Pour cette méthode titrimétrique de détermination d'un indice de pollution gazeuse acide on a utilisé un appareil ORION RESEARCH model 701 A/digital IONALYSER.

La détermination des concentrations de FN se base sur l'intensité d'obscurcissement du filtre à travers lequel passe l'air. La méthode de référence de l'OCDE indiquée dans la Directive 80/779/CEE (méthode basée sur la réflectométrie) a été utilisée, ainsi que les recommandations pour l'implantation de cette Directive (DG XI/B/2 du 03/16/89).

Les niveaux de CO, NO_x et O₃ ont été déterminés en temps réel avec des analyseurs automatiques. L'analyse continue de CO est réalisée avec un appareil CO10M, par la méthode de corrélation par UV N DISP ; pour la détermination de NO_x la méthode de chimiluminescence a été utilisée en effectuant les mesures avec un appareil Environnement AC30M ; l'O₃ a été mesuré avec un appareil 1003RS par la méthode d'absorption UV.

Dans le traitement statistique des données, on a pris en compte les « semestres tropiques » soit du 1^{er} avril au 30 septembre et du 1^{er} octobre au 31 mars de l'année suivante.

3. Résultats

3.1. Acidité forte et fumées noires dans la région de Porto

Pour l'étude de l'évolution des concentrations d'AF et FN au cours du temps, les moyennes mensuelles ont été calculées pour toutes les stations, en considérant séparément les données recueillies les jours de la semaine et les données obtenues pendant les week-ends et les jours fériés. En ce qui concerne l'AF, les stations MT et PR ont été sélectionnées pour une représentation graphique de ce traitement statistique (Fig. 2 et 3). La station MT représente significativement l'influence des émissions industrielles, pendant que la station PR a été initialement considérée comme référence.

Les moyennes arithmétiques annuelles d'acidité forte et fumées noires ont été obtenues avec une incertitude de $\pm 5\%$. Les degrés de confiance 95 % sont utilisés pour faciliter la compréhension des altérations de la qualité de l'air, ce qui permet d'effectuer des comparaisons entre plusieurs années [5]. La figure 4 montre les valeurs obtenues pour la station MT. La figure 5 montre les valeurs à la station PR.

La moyenne arithmétique annuelle et le percentile 50 permettent de caractériser l'état de pollution chronique d'un site. Le percentile 50 et la moyenne arithmétique diffèrent d'autant plus que les pointes de concentration sont plus prononcées. Il est préférable de prendre en considération le percentile 98 pour décrire la pollution de pointe d'un site au lieu des valeurs maximales. La procédure contraire comporte comme inconvénient l'attribution d'une

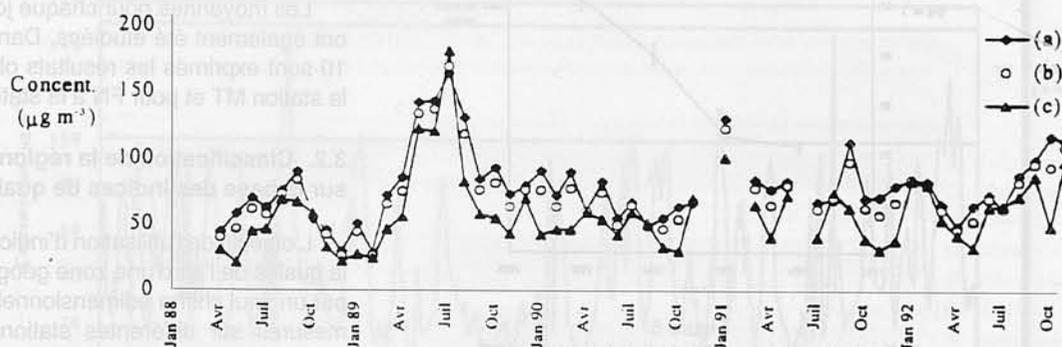


Figure 2.

Moyennes mensuelles d'AF obtenues à la station MT :

- (a) Concentrations moyennes mensuelles des jours de la semaine ;
- (b) Concentrations moyennes mensuelles ;
- (c) Concentrations moyennes mensuelles des week-end et jours fériés.

Average monthly strong acidity data in station MT :

- (a) Mean monthly levels in the working days of the week ;
- (b) Mean monthly levels ;
- (c) Mean monthly levels in week-end and days off.

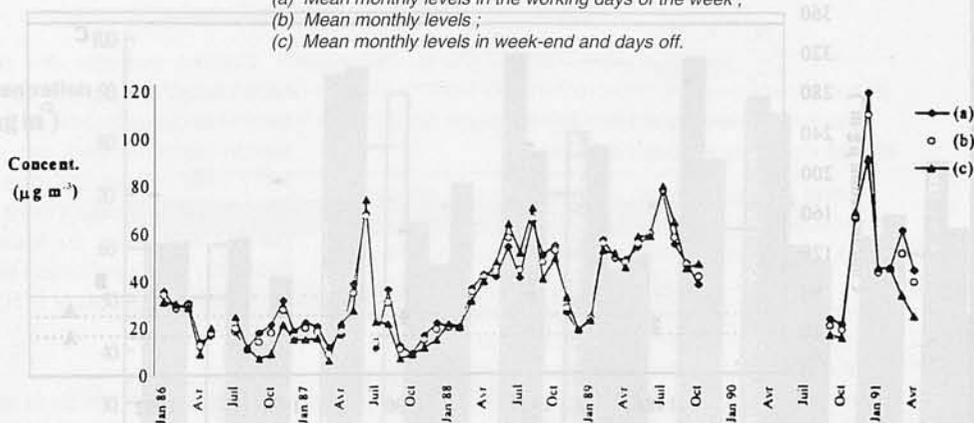


Figure 3.

Moyennes mensuelles d'AF obtenues à la station PR :

- (a) Concentrations moyennes mensuelles des jours de la semaine ;
- (b) Concentrations moyennes mensuelles ;
- (c) Concentrations moyennes mensuelles des week-end et jours fériés.

Average monthly strong acidity data in station PR :

- (a) Mean monthly levels in the working days of the week ;
- (b) Mean monthly levels ;
- (c) Mean monthly levels in week-end and days off.

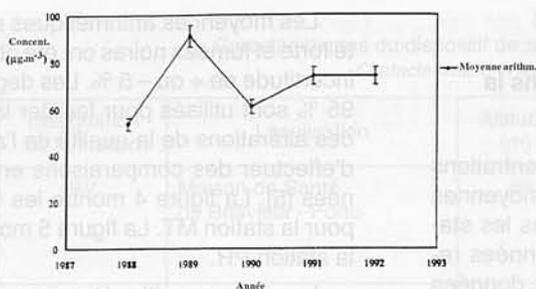


Figure 4.
Concentrations moyennes d'AF à la station MT
avec les degrés de confiance ($\alpha = 0,05$).

*Strong acidity annual average concentrations with 95%
confidence intervals in station MT.*

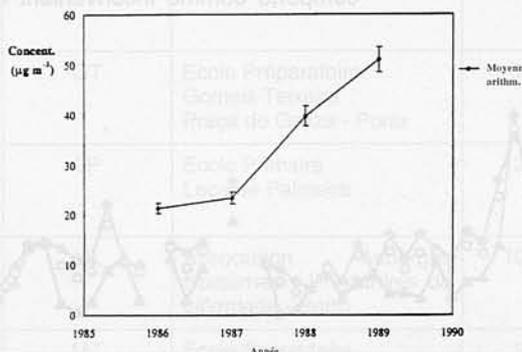


Figure 5.
Evolution de la qualité de l'air à la station PR
de 1986 à 1989 : niveaux d'AF ($\alpha = 0,05$).

*Strong acidity annual average concentration trend pattern
in station PR.*

importance excessive à une donnée associée à un temps de mesure bref et à un évènement ponctuel susceptible d'être non représentatif des épisodes de pointe généralement rencontrés en station [6].

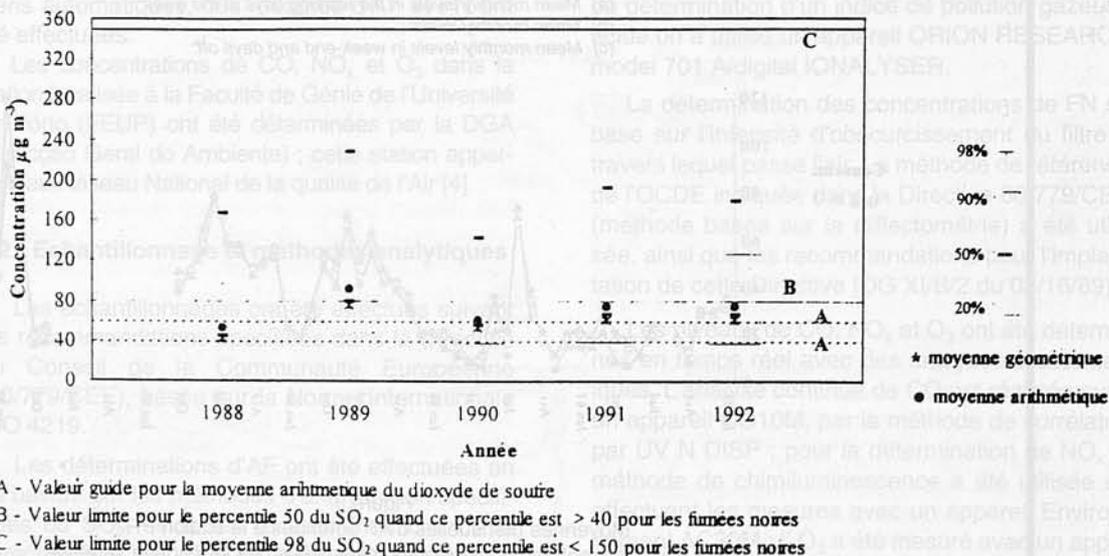
Les valeurs des percentiles 98, 90, 50 et 20 et les moyennes arithmétiques et géométriques sont représentées dans la figure 6 ; ce graphique montre également les valeurs guides pour la moyenne arithmétique et les valeurs limites pour les percentiles 90 et 50 fixées par la législation portugaise relative à la concentration de SO_2 dans l'atmosphère [7]. En l'absence de réglementation pour l'AF, celle correspondant au SO_2 a été utilisée, étant donné qu'on admet que les concentrations d'AF représentent des valeurs qui sont en défaut par rapport au SO_2 [1].

Les concentrations moyennes journalières de FN pour deux stations de caractéristiques plus urbaines sont représentées dans les figures 7 et 8.

Les moyennes pour chaque jour de la semaine ont également été étudiées. Dans les figures 9 et 10 sont exprimés les résultats obtenus pour AF à la station MT et pour FN à la station ML.

3.2. Classification de la région urbaine sur la base des indices de qualité de l'air

L'objectif de l'utilisation d'indices est de qualifier la qualité de l'air d'une zone géographique donnée par un seul chiffre adimensionnel issu de résultats mesurés sur différentes stations pour plusieurs polluants atmosphériques. L'information transmise au public doit être facilement comprise, à travers une échelle de classification simple, applicable à tout polluant pour lequel des normes existent. De



- A - Valeur guide pour la moyenne arithmétique du dioxyde de soufre
- B - Valeur limite pour le percentile 50 du SO_2 quand ce percentile est > 40 pour les fumées noires
- C - Valeur limite pour le percentile 98 du SO_2 quand ce percentile est < 150 pour les fumées noires

Figure 6.
Evolution de la qualité de l'air à la station MT de 1988 à 1992 :
niveaux d'AF et comparaison avec les valeurs de la législation pour le SO_2 .

Air pollution trend pattern from 1988 to 1992 in station MT : strong acidity annual average concentrations and portuguese limit and guide values for sulfur dioxide.

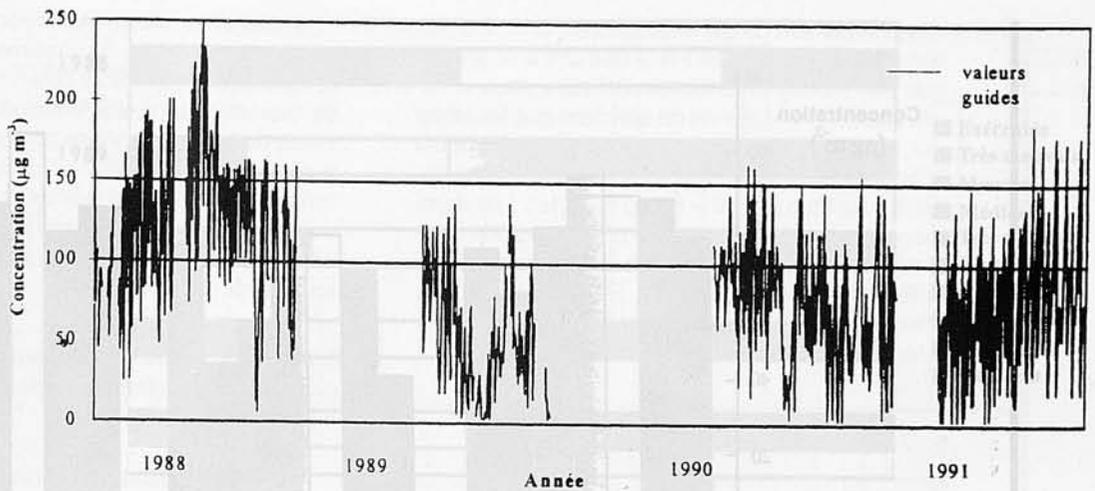


Figure 7.
Concentrations moyennes journalières de FN à la station ML d'Août 88 à Décembre 91.
Black smoke average daily concentrations in station ML from August 88 to December 91.

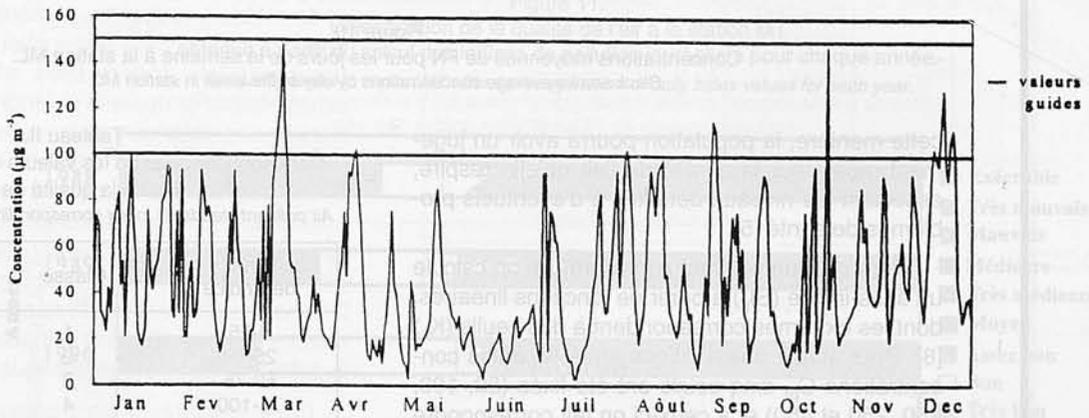


Figure 8.
Concentrations moyennes journalières de FN à la station FE en 1992.
Black smoke daily average concentrations in station FE in 1992.

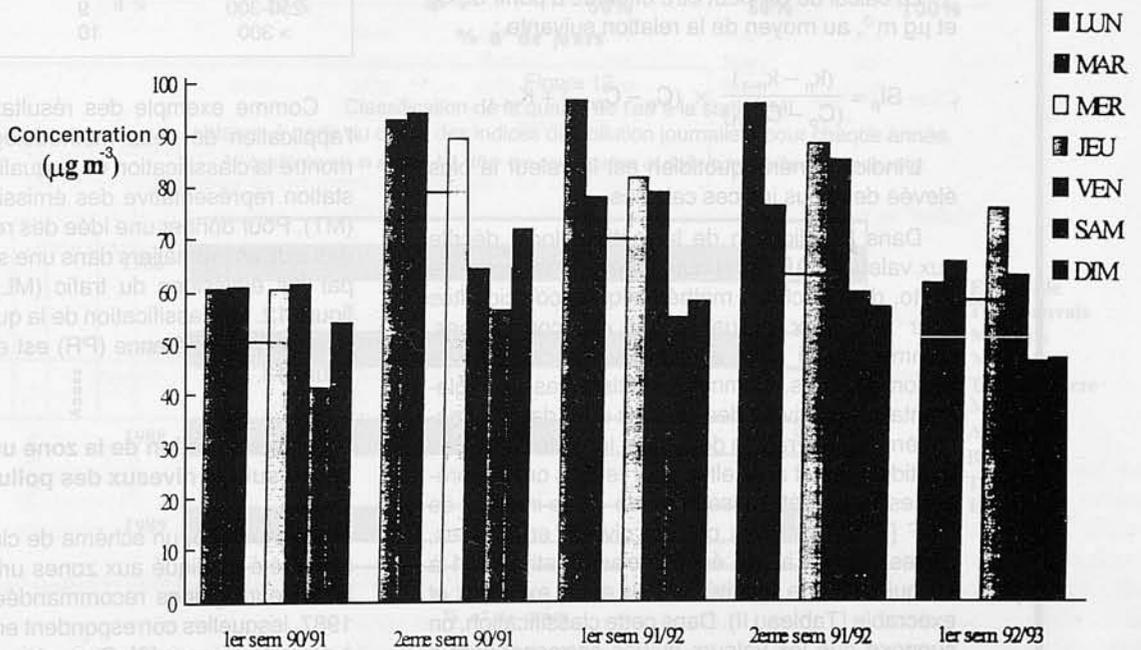


Figure 9.
Concentrations moyennes d'AF pour les jours de la semaine à la station MT.
Strong acidity average concentrations by day of the week in station MT.

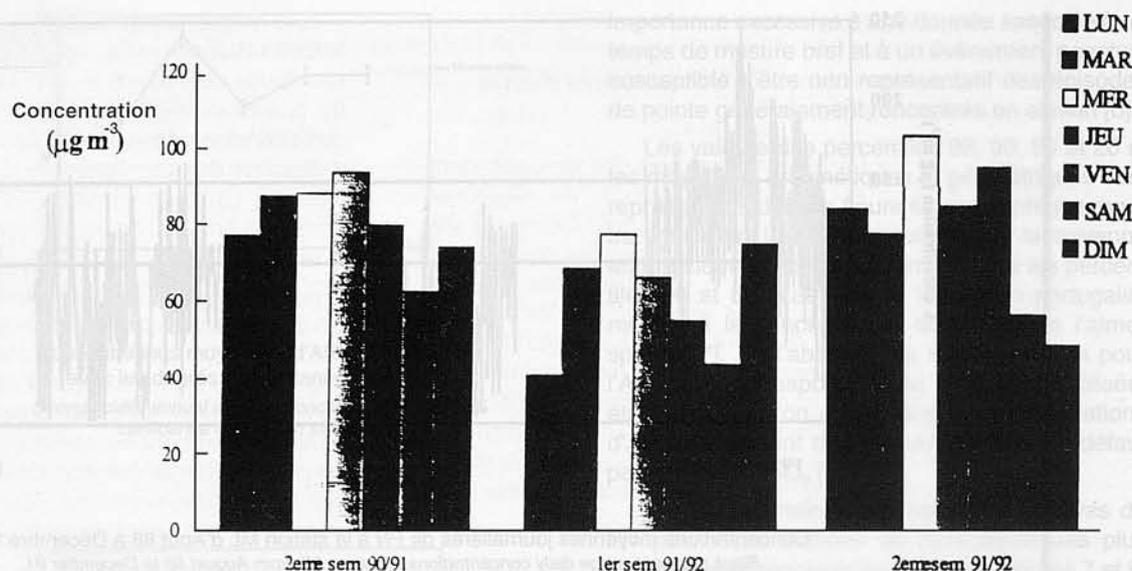


Figure 10.
Concentrations moyennes de FN pour les jours de la semaine à la station ML.
Black smoke average concentrations by day of the week in station ML.

cette manière, la population pourra avoir un jugement rapide sur la qualité de l'air qu'elle respire, associant les niveaux détectés à d'éventuels problèmes de santé [5].

Pour chaque polluant considéré (p), on calcule un sous-indice (SI_p) à partir de fonctions linéaires, dont les extrêmes correspondent à des seuils (K_n) [8]. Pour établir des relations entre K_n et les concentrations C_p , cinq seuils ont été fixés (50, 100, 150, 250 et 450) et à ceux-ci on fait correspondre des limites de concentration réglementées par la législation.

Le calcul de SI_p peut être effectué à partir de C_p et $\mu\text{g m}^{-3}$, au moyen de la relation suivante :

$$SI_p = \frac{(k_n - k_{n-1})}{(C_p - C_{pn-1})} \times (C_p - C_{pn-1}) + K_{(n-1)}$$

L'indice général quotidien est la valeur la plus élevée des sous indices calculés.

Dans l'application de la méthodologie décrite aux valeurs d'AF et FN obtenues pour la région de Porto, des fonctions mathématiques coïncidentes pour les deux polluants ont été considérées, comme ce qui s'est effectué en France pour la région de Paris. Comme il n'existe pas de réglementation relative à des niveaux d'AF dans l'atmosphère, pour la raison déjà citée, les valeurs guides quotidiennes et annuelles pour le SO_2 ont été précisées pour l'établissement de sous-indices de L'AF [1]. Les indices ont été divisés en classes, correspondant à une échelle classificative de 1 à 10 qui définit la qualité de l'air entre excellent et exécrable (Tableau II). Dans cette classification, on suppose que les valeurs guides correspondent à un air de bonne ou moyenne qualité, pendant que les valeurs limites situent un air de qualité médiocre à très mauvaise.

Tableau II.
Correspondance entre les valeurs des indices et classes de la qualité de l'air
Air pollutant standards index corresponding with air quality levels

Valeur de l'indice	Classe	Qualité de l'air
0-25	1	Excellent
25-50	2	Très bon
50-75	3	Bon
75-100	4	Assez bon
100-125	5	Moyen
125-150	6	Médiocre
150-200	7	Très médiocre
200-250	8	Mauvais
250-300	9	Très mauvais
> 300	10	Exécrable

Comme exemple des résultats obtenus dans l'application de cette méthodologie, la figure 11 montre la classification de la qualité de l'air pour la station représentative des émissions industrielles (MT). Pour donner une idée des résultats du calcul des indices journaliers dans une station influencée par les émissions du trafic (ML) on a choisi la figure 12. La classification de la qualité de l'air pour la station de référence (PR) est effectuée dans la figure 13.

3.3. Classification de la zone urbaine basée sur les niveaux des polluants

En Norvège, un schéma de classification différent a été appliqué aux zones urbaines, basé sur les valeurs guides recommandées par l'OMS en 1987, lesquelles correspondent en grande échelle, à ceux de ce pays [9]. Ces valeurs ont été établies en considérant les effets sur la santé, en particulier, des polluants traceurs et organiques cancérigènes contenus dans les particules en suspension de

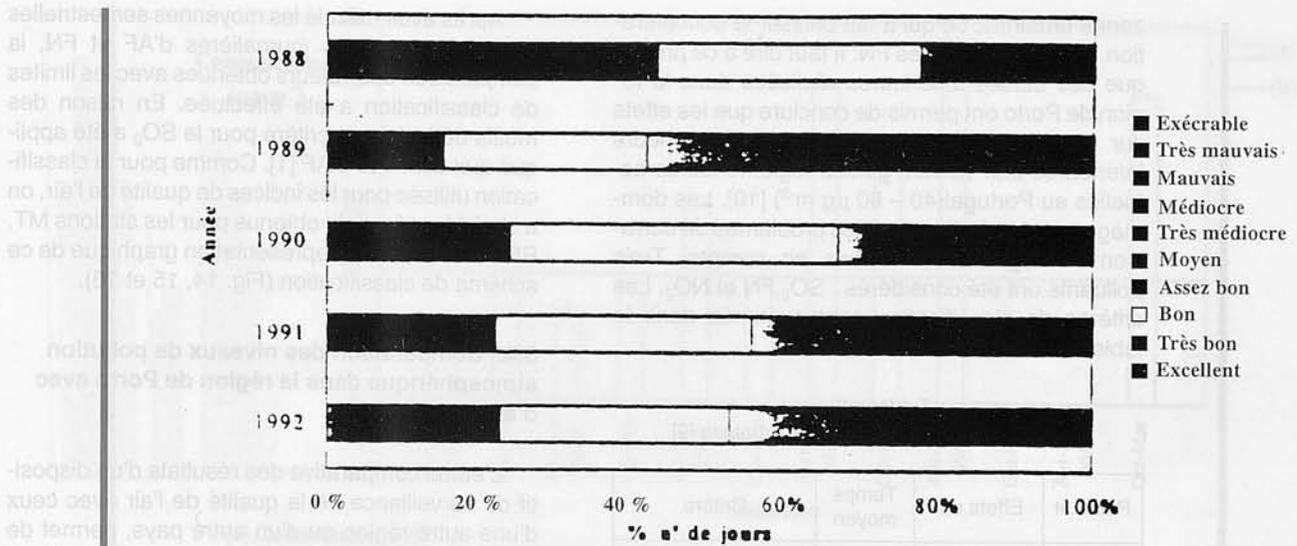


Figure 11.
 Classification de la qualité de l'air à la station MT
 obtenue à partir du calcul des indices de pollution journaliers pour chaque année.
Air quality levels in station MT after the computation of daily index values for each year.

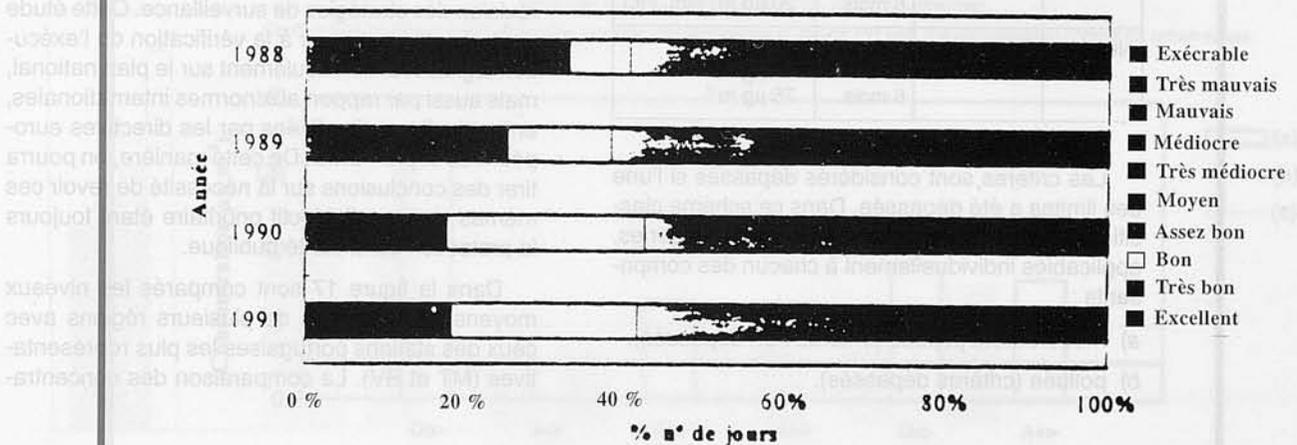


Figure 12.
 Classification de la qualité de l'air à la station ML
 obtenue à partir du calcul des indices de pollution journaliers pour chaque année.
Air quality levels in station ML after the computation of daily index values for each year.

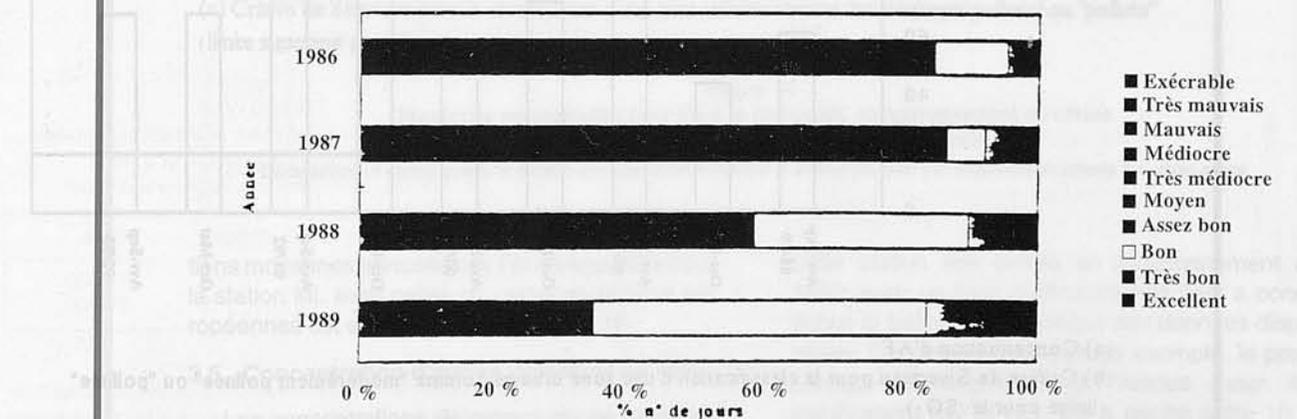


Figure 13.
 Classification de la qualité de l'air à la station PR
 obtenue à partir du calcul des indices de pollution journaliers pour chaque année.
Air quality levels in station ML after the computation of daily index values for each year.

zones urbaines, ce qui a fait baisser la concentration admissible pour les FN. Il faut dire à ce propos que des études antérieures réalisées dans la région de Porto ont permis de conclure que les effets sur la santé se font ressentir pour des teneurs inférieures aux valeurs guides réglementaires actuelles au Portugal ($40 - 60 \mu\text{g m}^{-3}$) [10]. Les dommages sur la végétation et les problèmes de corrosion ont également été pris en compte. Trois polluants ont été considérés : SO_2 , FN et NO_2 . Les critères de classification sont exprimés dans le tableau III.

Tableau III.
Critères classificatifs des zones urbaines [9]

Polluant	Effets sur	Temps moyen	Critère
SO_2	Santé Matériaux Végétation	24 h	$100 \mu\text{g m}^{-3}$
		6 mois	$20 \mu\text{g m}^{-3}$
FN	Santé	24 h	$100 \mu\text{g m}^{-3}$
		6 mois	$40 \mu\text{g m}^{-3}$ (lim. sup.)
		6 mois	$20 \mu\text{g m}^{-3}$ (lim. inf.)
NO_2	Santé	1 h	$200 \mu\text{g m}^{-3}$
		24 h	$100 \mu\text{g m}^{-3}$
		6 mois	$75 \mu\text{g m}^{-3}$

Les critères sont considérés dépassés si l'une des limites a été dépassée. Dans ce schéma classificatif, les villes sont divisées en deux catégories, applicables individuellement à chacun des composants :

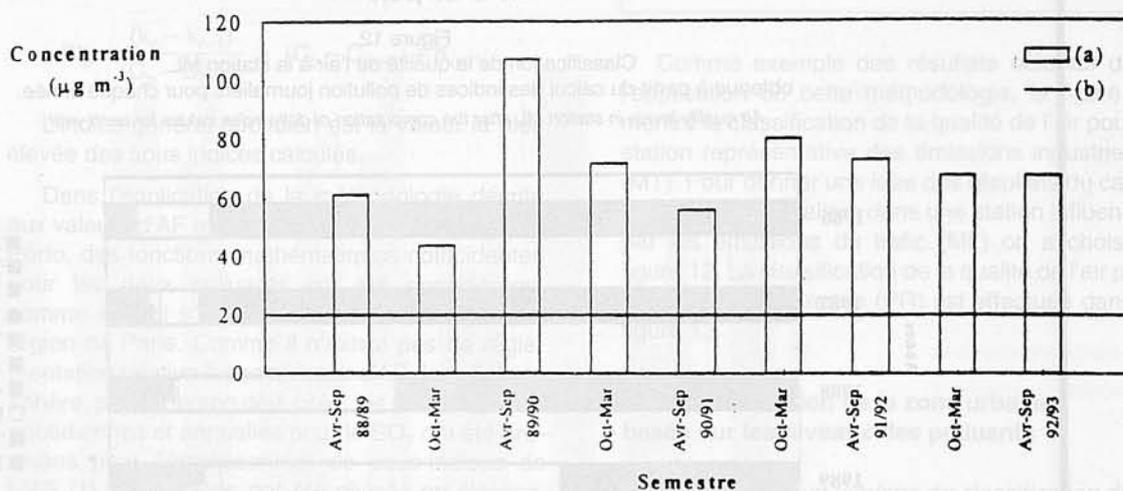
- a) modérément polluée (critères non dépassés),
- b) polluée (critères dépassés).

Après avoir calculé les moyennes semestrielles avec les moyennes journalières d'AF et FN, la comparaison des valeurs obtenues avec les limites de classification a été effectuée. En raison des motifs déjà cités, le critère pour le SO_2 a été appliqué aux données d'AF [1]. Comme pour la classification utilisée pour les indices de qualité de l'air, on a choisi les résultats obtenus pour les stations MT, PR et ML pour une représentation graphique de ce schéma de classification (Fig. 14, 15 et 16).

3.4. Comparaison des niveaux de pollution atmosphérique dans la région de Porto avec d'autres pays

L'étude comparative des résultats d'un dispositif de surveillance de la qualité de l'air avec ceux d'une autre région ou d'un autre pays, permet de vérifier si les tendances évolutives sont en phase et de mettre en relief les particularités de chaque région ; ce qui peut déboucher sur la prise de conscience de phénomènes en cours à large échelle spatio-temporelle et rendre nécessaire une révision des stratégies de surveillance. Cette étude peut encore contribuer à la vérification de l'exécution législative, non seulement sur le plan national, mais aussi par rapport aux normes internationales, en particulier celles fixées par les directives européennes et par l'OMS. De cette manière, on pourra tirer des conclusions sur la nécessité de revoir ces mêmes normes, l'objectif prioritaire étant toujours la protection de la santé publique.

Dans la figure 17 sont comparés les niveaux moyens annuels d'AF de plusieurs régions avec ceux des stations portugaises les plus représentatives (MT et BV). La comparaison des concentra-

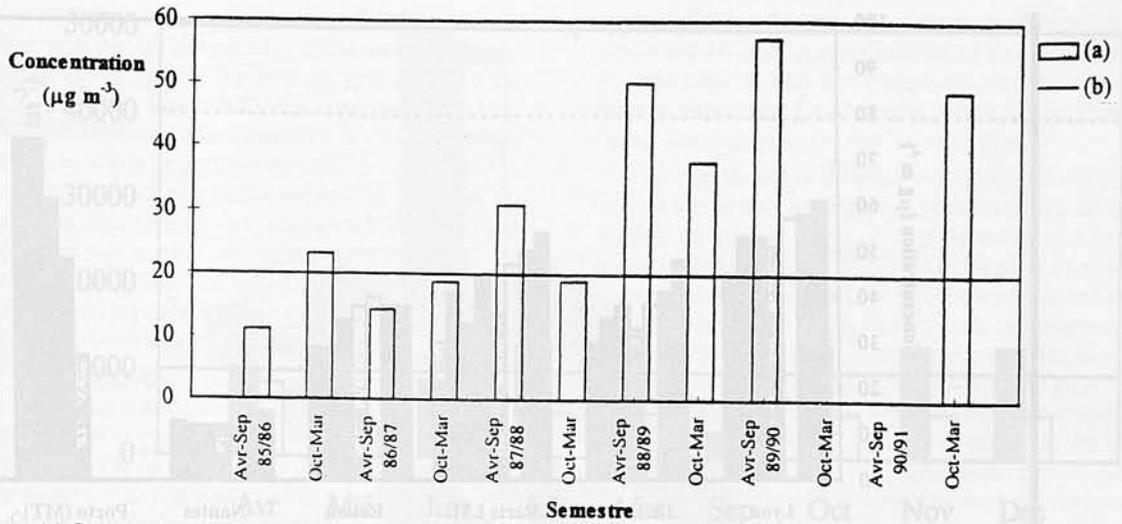


(a) Concentration d'AF
(b) Critère de Siverstsen pour la classification d'une zone urbaine comme "modérément polluée" ou "polluée" (limite pour le SO_2)

Figure 14.

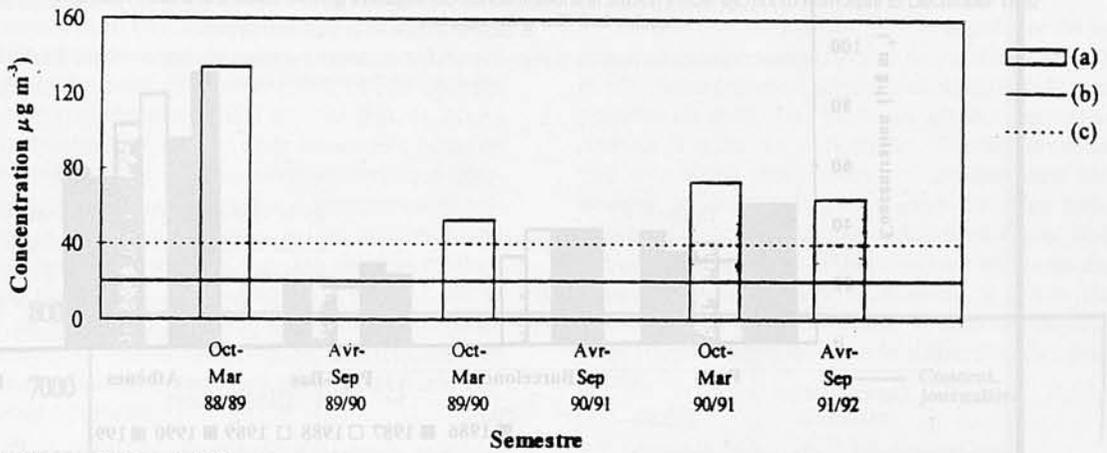
Moyennes semestrielles d'AF relatives à la station MT comparativement au critère proposé pour la classification de régions urbaines.

Comparison of strong acidity 6 months average concentrations in station MT with the classification criteria for urban areas.



(a) Concentration d'AF
 (b) Critère de Sivertsen pour la classification d'une zone urbaine comme "modérément polluée" ou "polluée" (limite pour le SO₂)

Figure 15.
 Moyennes semestrielles d'AF relatives à la station PR comparativement au critère proposé pour la classification de régions urbaines.
 Comparison of strong acidity 6 months average concentrations in station PR with the classification criteria for urban areas.



(a) Concentration de FN
 (b) Limite inférieure pour fumées noires, selon le critère de Sivertsen
 (c) Critère de Sivertsen pour la classification d'une zone urbaine comme "modérément polluée" ou "polluée" (limite supérieure pour fumées noires)

Figure 16.
 Moyennes semestrielles pour FN à la station ML comparativement au critère proposé pour la classification de régions urbaines.
 Comparison of strong acidity 6 months average concentrations in station ML with the classification criteria for urban areas.

tions moyennes annuelles de FN enregistrées pour la station ML avec celles de certaines régions européennes est effectuée dans la figure 18.

3.5. Concentration d'autres polluants en 1992

Les concentrations de monoxyde de carbone, d'oxydes d'azote et d'ozone publiées par la DGA pour la station localisée à la FEUP, ont également été utilisées pour faire une comparaison relative à la qualité de l'air avec d'autres régions. Le fait que

cette station soit entrée en fonctionnement en 1992, avec un taux d'efficacité très bas, a conditionné le traitement statistique des données disponibles. On peut donner comme exemple, le pourcentage d'enregistrements valides pour les composants NO et NO₂ qui a oscillé entre 10 et 53 %, quand les mesures ont été effectuées sur à peine cinq mois. De cette manière, les paramètres globaux manquent de signification statistique, limitant donc l'analyse comparative.

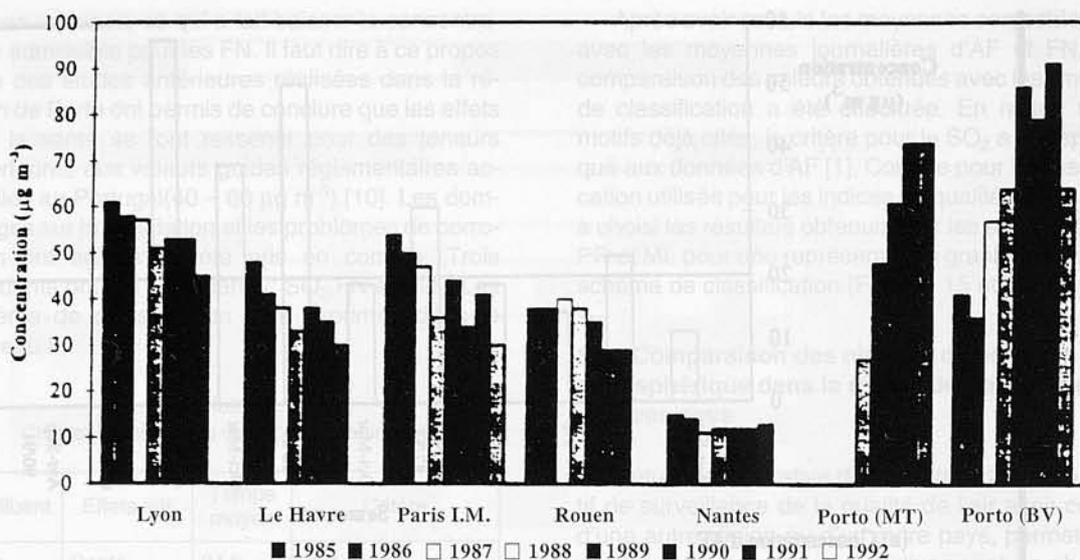


Figure 17.
Evolution des concentrations moyennes annuelles d'AF dans différentes régions [6].
Strong acidity annual average concentrations in different areas.

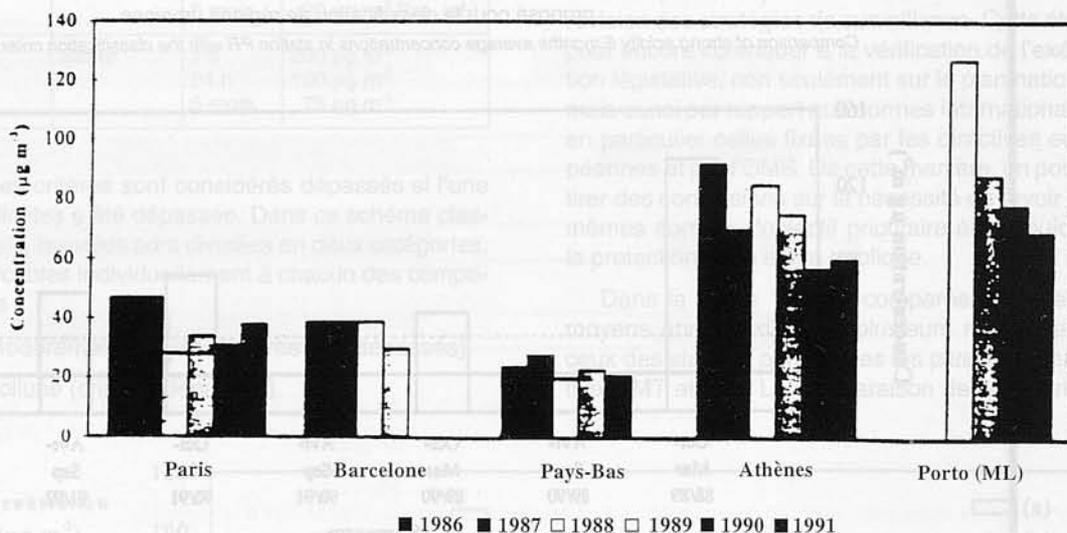


Figure 18.
Evolution des concentrations moyennes annuelles de FN dans différentes régions [11].
Black smoke annual average concentrations in different areas.

Pour le monoxyde de carbone, on dispose d'un plus grand nombre de mesures. Dans le tableau IV on a comparé les moyennes horaires maximales et minimales enregistrées en 1992 par la station de la FEUP et dans plusieurs stations parisiennes avec des caractéristiques semblables (mesure de pollution de proximité)^(a) [16]. Les moyennes maximales sur 1 heure et les moyennes maximales sur 8 heures consécutives sont indiquées dans la figure 19. Dans la figure 20, on peut observer les niveaux quotidiens.

(a) Les auteurs de la référence [16] précisent que la valeur indiquée est une valeur maximale annuelle d'une station de mesure de proximité particulièrement exposée.

Tableau IV.
Moyennes horaires maximales et minimales enregistrées à la station de la FEUP et à Paris
CO ambient air concentrations in Paris and FEUP

Moyennes horaires	FEUP	Paris
valeur max.	13 200	41 500
valeur min.	112	21 000

La figure 21 montre les concentrations maximales de NO₂, NO et O₃ enregistrées à Paris et celles mesurées à la station de la FEUP. La comparaison avec les valeurs recommandées par l'OMS se trouve dans le tableau V, où sont enregistrées les concentrations maximales pour le NO₂ dans ce site

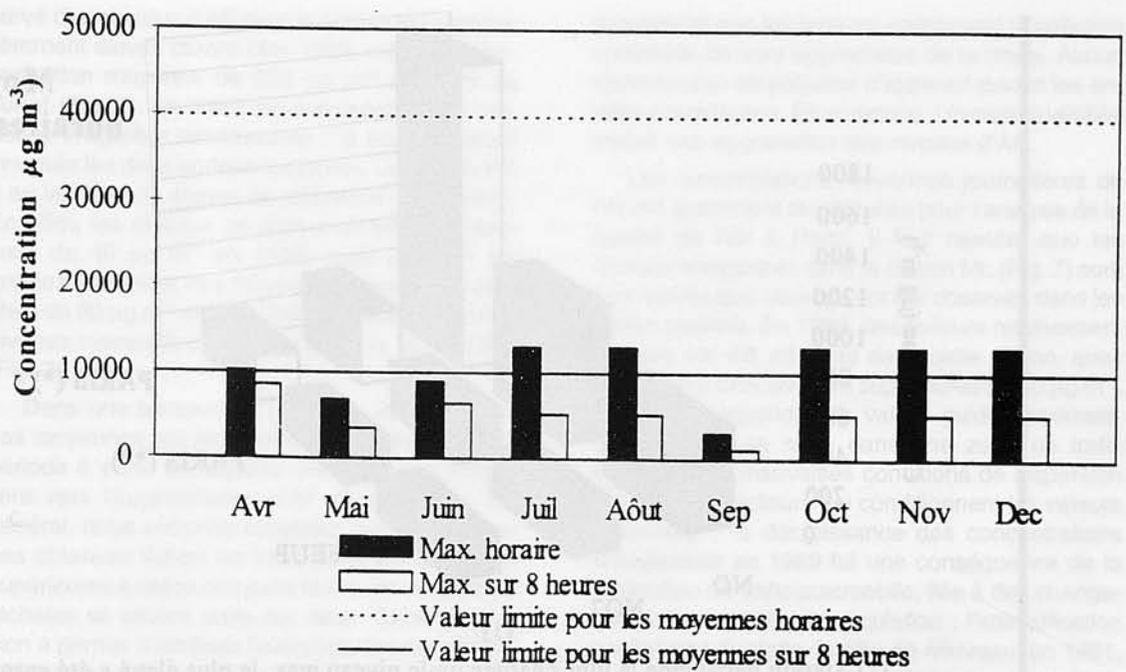


Figure 19.
 Concentrations de CO : maximales sur 1 h et moyennes mobiles maximales sur 8 h
 au long de plusieurs mois à la station de FEUP en 1992 avec les limites correspondants.
 Highest 1-hour and 8-hours moving averages CO concentrations in station FEUP by month from April to December 1992
 corresponding with limit values.

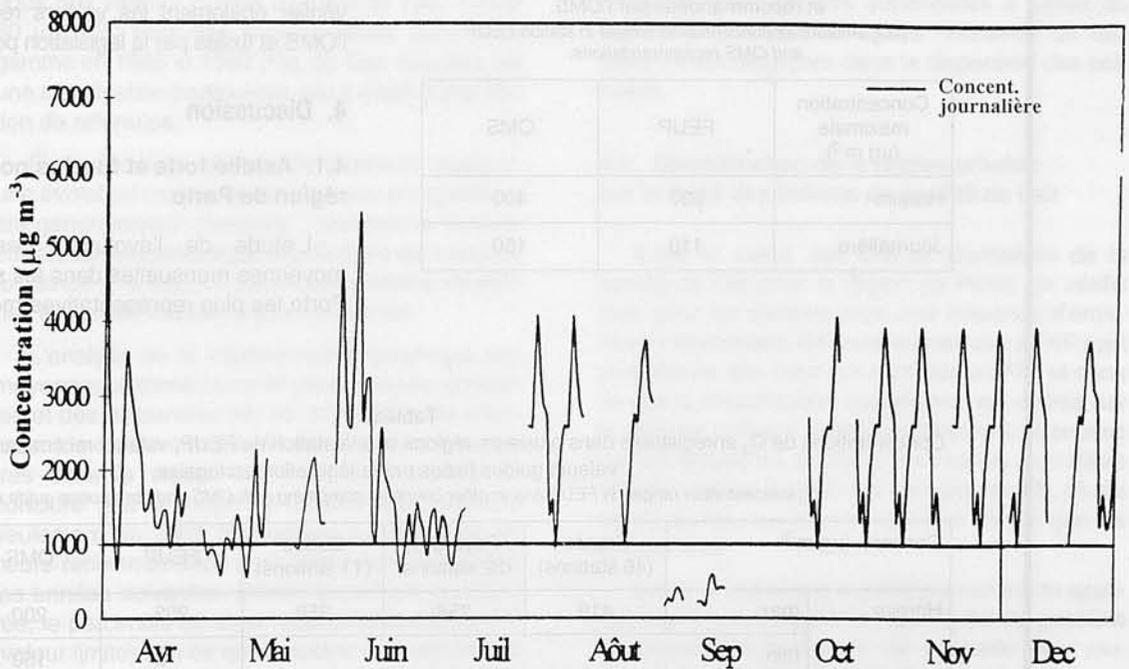
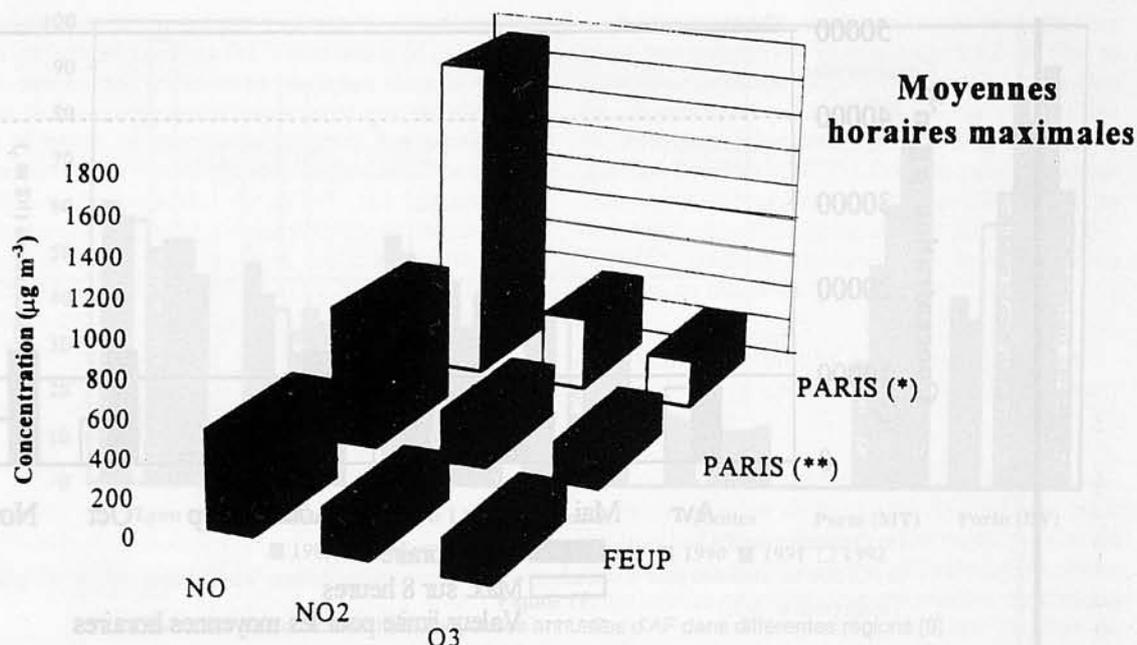


Figure 20.
 Concentrations moyennes journalières de CO en 1992 à la station de FEUP.
 Daily average CO concentrations in 1992 in station FEUP.



(*) Station parisienne la plus chargée où le niveau max. le plus élevé a été enregistré
 (**) Station parisienne la moins chargée où le niveau max. le moins élevé a été enregistré

Figure 21.

Concentrations horaires maximales à la station de la FEUP et dans les stations parisiennes la plus chargée et la moins chargée.

Highest 1-hour concentrations in station FEUP and two stations of Paris : the one which has the maximum value and other with the minimum value.

Tableau V.
 Concentrations maximales enregistrées à la station de la FEUP et recommandées par l'OMS.
NO₂ ambient air concentration ranges in station FEUP and OMS recommendations.

Concentration maximale (µg m ⁻³)	FEUP	OMS
Horaire	237	400
Journalière	110	150

de la ville de Porto. Le tableau VI présente quelques valeurs de concentrations mesurées à la station portugaise pour le O₃ et dans d'autres régions. On peut vérifier également les valeurs recommandées par l'OMS et fixées par la législation portugaise.

4. Discussion

4.1. Acidité forte et fumées noires dans la région de Porto

L'étude de l'évolution des concentrations moyennes mensuelles dans les sites de la ville de Porto les plus représentatives montre qu'il est ob-

Tableau VI.
 Concentrations de O₃ enregistrées dans plusieurs régions et à la station de FEUP, valeurs recommandées par l'OMS et valeurs guides fixées par la législation portugaise.
O₃ concentration ranges in FEUP and in other countries comparing with OMS and portuguese guide values.

Concent. (µg m ⁻³)		France (46 stations)	Pays-Bas (32 stations)	Suisse (11 stations)	FEUP	OMS	Valeur guide
Horaire	max.	416	258	258	203	200	180
	min.				2	150	
Journalière	max.				83		65
	min.				15		

servé des niveaux d'AF pour la station MT particulièrement élevés durant l'été 1989, avec une concentration moyenne de $200 \mu\text{g m}^{-3}$ au mois de Juillet (Fig. 2). En 1990, on a enregistré une tendance irrégulière décroissante ; la situation étant inversée les deux années suivantes. La station PR a eu le statut de station de référence avant 1987. En effet, les niveaux se sont maintenus en-dessous de $40 \mu\text{g m}^{-3}$ en 1986, mais pendant les années suivantes, des moyennes mensuelles proches de $80 \mu\text{g m}^{-3}$ ont été obtenues, atteignant des niveaux mensuels de $120 \mu\text{g m}^{-3}$ à la fin de 1990 (Fig. 3).

Dans une perspective générale, les plus basses moyennes ont été relevées en 1986 et 1987, période à partir de laquelle une tendance irrégulière vers l'augmentation d'AF s'est vérifiée. En général, nous pouvons constater que les moyennes obtenues durant les jours de la semaine sont supérieures à celles des jours fériés, les moyennes globales se situant entre les deux. Cette conclusion a permis d'attribuer l'élévation des concentrations atmosphériques à l'activité industrielle et au trafic.

L'analyse comparative multiple appliquée au graphique des moyennes arithmétiques annuelles avec un degré de confiance de 5 %, pour la station MT, permet de conclure que les niveaux d'AF sont significativement différents, à l'exception des valeurs correspondant à 1991 et 1992 (Fig. 4). Après l'observation des valeurs de la station PR, selon ce qui s'est vérifié pour la moyenne arithmétique mensuelle, nous pouvons voir que la moyenne arithmétique a également enregistré une augmentation progressive, en passant par des niveaux en-dessous des valeurs guides en 1986 et 1987 (40 et $60 \mu\text{g m}^{-3}$), pour des niveaux situés dans cette gamme en 1988 et 1989 (Fig. 5). Ces résultats ont une signification particulière, car il s'agit d'une station de référence.

Dans l'analyse globale de plusieurs stations, une évolution croissante des niveaux enregistrés a été généralement observée ; néanmoins, aucune corrélation mathématique significative qui traduit la tendance à la hausse des concentrations moyennes annuelles n'a été mise en évidence.

L'analyse de la représentation graphique des moyennes arithmétiques et géométriques annuelles et des percentiles 98, 90, 50 et 20 a été effectuée. L'examen comparatif des résultats enregistrés dans la station MT (Fig. 6) a permis de conclure que la moyenne arithmétique respecte seulement en 1988 les valeurs guides ; ces teneurs recommandées sont cependant dépassées les années suivantes. Durant la période considérée, le percentile 50 s'est rapproché de $80 \mu\text{g m}^{-3}$ (valeur limite) ; en ce qui concerne les valeurs des percentiles 98, il n'est pas observé d'évolution notable et les niveaux rencontrés restent toujours à des valeurs inférieures à la limite fixée. Ainsi, on peut conclure que les valeurs guides ont été dé-

passées et que les teneurs concernant la pollution chronique se sont approchées de la limite. Aucun épisode aigu de pollution n'apparaît durant les années considérées. En revanche, l'évolution vérifiée traduit une aggravation des niveaux d'AF.

Les concentrations moyennes journalières de FN ont également été utilisées pour l'analyse de la qualité de l'air à Porto. Il faut rajouter que les niveaux enregistrés dans la station ML (Fig. 7) sont plus élevés que ceux qui ont été observés dans les autres stations. En 1988, des teneurs relativement élevées ont été atteintes dans cette région, avec des valeurs fréquemment supérieures à $150 \mu\text{g m}^{-3}$, ce qui correspond à la valeur guide maximale. Cette station se situe dans une zone de trafic intense et de mauvaises conditions de dispersion qui sont des facteurs qui conditionnent les valeurs observées ; la décroissance des concentrations enregistrées en 1989 fut une conséquence de la diminution du trafic automobile, liée à des changements temporaires de circulation ; l'intensification postérieure du trafic, justifie de nouveau, en 1991, la fréquence de valeurs supérieures aux valeurs guides. A la station FE, en raison de meilleures conditions de dispersion, les valeurs guides actuelles sont respectées (Fig. 8).

L'étude des moyennes pour chaque jour de la semaine montre une variabilité des résultats (Fig. 9 et 10). Nous pouvons donc conclure qu'il n'est pas possible de mettre en évidence un jour avec des niveaux plus élevés de pollution. D'après l'analyse des moyennes mensuelles on constate que les teneurs observées durant le week-end sont inférieures, montrant ainsi l'influence du trafic et des activités industrielles. Le fait que les moyennes du dimanche puissent être supérieures à celles du samedi peut mettre en cause l'influence de facteurs météorologiques dans la dispersion des polluants.

4.2. Classification de la région urbaine sur la base des indices de qualité de l'air

Dans le calcul des indices journaliers de la qualité de l'air pour la région de Porto, on vérifie que, pour les stations avec une influence d'émissions industrielles, les sous-indices dus à l'AF sont plus élevés que ceux qui sont dus au FN, et dans ce cas la classification quotidienne est définie par le premier polluant. Dans les stations influencées par les émissions du trafic, les indices journaliers ont été obtenus à partir des données de FN, ce qui est dû au fait que ceux-ci sont plus élevés que les valeurs d'AF.

Après le calcul des indices journaliers en appliquant la fonction mathématique (1) il a été possible de classer la qualité de l'air mesurée dans plusieurs sites. En comparant la classification obtenue pour la station MT de 1988 à 1992, on observe la diminution du pourcentage du nombre de jours inclus dans les classes 1 à 3, alors que les classes

avec des indices de pollution plus élevés ayant initialement de bas pourcentages, sont à la fin de la période considérée plus conséquents (Fig. 11). Cette tendance évolutive est également observée à la station ML, où on enregistre une décroissance progressive du nombre de jours englobés dans les classes 1 et 2 (Fig. 12). L'étude d'évolution enregistrée à la station PR mérite à nouveau une attention spéciale (Fig. 13). Les résultats ici obtenus démontrent clairement que la situation s'aggrave de plus en plus. En effet, pendant que en 1986 et 1987, à la classe 1 de la qualité de l'air correspondait une valeur supérieure à 60 % du total des jours, cette même classe y est représentée approximativement par 20 % en 1988 et, l'année suivante, le pourcentage décroît d'environ 10 %. D'un côté, au cours de cette période, les classes 3, 4, et 5 ont une représentativité croissante.

L'étude globale permet de conclure que, pour une station quelconque, la qualité de l'air n'a jamais été placée dans la dixième classe. Pourtant, les deux classes antérieures ont eu une représentation dans presque toutes les stations, particulièrement après 1989. On constate également une augmentation, même si elle est irrégulière, de la prépondérance des classes intermédiaires au détriment des classes 1 et 2. Cet aspect est surtout important quand les années 1986 et 1987 sont comparées avec la période restante. Même si les jours pour chaque année, inclus dans des classes proches de 10 ont, en terme de pourcentage, peu de signification, le fait est que l'évolution enregistrée dans la période considérée traduit une aggravation de la qualité de l'air.

4.3. Classification de la zone urbaine basée sur les niveaux des polluants

L'analyse graphique des résultats pour AF, enregistrés dans la station MT, a permis de mettre en évidence quels que soient les semestres représentés que le critère de Sivertsen pour la classification de l'atmosphère urbaine est dépassé ; cette zone est donc classée comme « polluée » (Fig. 14).

Dans l'application de ce critère restrictif, on ajoute encore une fois l'évolution observée dans la station de référence PR. On montre ici, à l'évidence, le passage d'une situation avec des moyennes d'AF inférieures à $20 \mu\text{g m}^{-3}$ dans les premiers semestres considérés, par des moyennes significativement plus élevées après 1990 qui amènent généralement à classer la zone comme « polluée » (Fig. 15).

Généralement, on vérifie que dans toutes les stations, la valeur restrictive de $20 \mu\text{g m}^{-3}$ établie par Siversten est largement dépassée. Selon ce critère, la zone urbaine de Porto est classée comme « polluée » en raison de la présence de polluant AF.

Dans la station ML, fortement influencée par le trafic automobile, ce sont les teneurs de FN qui ont

le plus d'importance. Selon le critère de Sivertsen, son classement est « zone polluée », dans la mesure où les moyennes semestrielles dépassent la limite supérieure de $40 \mu\text{g m}^{-3}$ dans un des quelconque semestres considérés (Fig. 16).

Pour la majorité des stations, les moyennes de FN de chaque semestre excèdent rarement la limite supérieure recommandée dans la classification des zones urbaines. Dans la plus grande majorité des cas, les niveaux enregistrés se situent entre 20 et $40 \mu\text{g m}^{-3}$ ou sont inférieurs à la première valeur, et la classification attribuée est donc « zone modérément polluée ». Pourtant, ce résultat doit être interprété avec prudence, car les zones les plus touchées par les émissions du trafic automobile sont représentées dans la région, uniquement par la station ML, pour laquelle ce critère attribue la classification de « zone polluée ».

4.4. Comparaison des niveaux de pollution atmosphérique dans la région de Porto avec d'autres pays

La comparaison des données de pollution atmosphérique d'un pays à l'autre est complexe pour les raisons suivantes [11] :

- gestion décentralisée des réseaux de surveillance ;
- hétérogénéité des données publiées. A titre d'exemple, pour caractériser la pollution par le SO_2 trois grandeurs statistiques différentes sont utilisées : percentile 98 des moyennes 24 heures, percentile 98 des moyennes semi-horaires, percentile 95 des moyennes semi-horaires sur l'année civile ou tropique ;
- la philosophie de conception de réseaux de surveillance est différente d'un pays à l'autre ;
- le nombre de stations varie selon les zones considérées et, de cette façon, les moyennes respectives peuvent avoir un poids différent ;
- les matériaux et les méthodologies analytiques ne sont pas encore totalement harmonisées, ainsi que le mode d'acquisition et de traitement des données.

D'un autre côté, les concentrations moyennes calculées pour une certaine zone et pour une période déterminée dépendent des émissions, de phénomènes de transport à longue et moyenne distance, des conditions locales de dispersion de polluants et de la climatologie locale et synoptique. Tous ces facteurs pourront se traduire par une analyse comparative basée sur les moyennes statistiques non représentatives de la qualité de l'air dans cette zone. Cependant, il est possible de se rapprocher des courbes d'évolution (de moyennes et percentiles), en vérifiant si les tendances sont en phase pour effectuer une analyse critique de la situation existante en terme de qualité de l'air. Le principal objectif proposé consiste à comparer qualitativement l'évolution des niveaux de polluants

enregistrés dans plusieurs régions, surtout urbaines. On ne prétend pas réellement réaliser un examen critique des teneurs de pollution absolues associées à des réalités différentes.

Plusieurs auteurs rapportent une tendance généralisée à la baisse des niveaux de pollution pour le SO_2 et particules, qui apparaît comme une conséquence des mesures prises pour protéger l'environnement [1, 6, 11, 12 et 13]. Dans une étude du comportement évolutif des concentrations d'AF et particules fines en suspension à Paris, le Professeur FESTY indique une réduction des niveaux comprise entre 50 et 70 % après 1964 [14]. Dans les dernières années prises en compte dans cette étude qui coïncident avec la période considérée pour l'évaluation de la qualité de l'air à Porto (1986 à 1989), les concentrations moyennes d'AF enregistrées dans la capitale française se situent dans la gamme 40-50 $\mu\text{g m}^{-3}$, pendant que les niveaux de FN oscillent entre 30 et 50 $\mu\text{g m}^{-3}$.

Dans une étude comparative de la pollution atmosphérique enregistrée en 1991 dans plusieurs métropoles, le Docteur QUENEL a conclu que, pour la plus grande partie des villes d'Europe, les concentrations moyennes annuelles de SO_2 se situent en-dessous de 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ [15]. Après l'analyse de la figure 17, où sont comparés les niveaux moyens d'AF de plusieurs régions avec ceux des deux stations portugaises les plus représentatives, on vérifie que le niveau de 50 $\mu\text{g m}^{-3}$ est dépassé dans la station MT à partir de 1989 et dans la station BV après 1987. En 1991, une concentration moyenne proche de 100 $\mu\text{g m}^{-3}$ a été enregistrée par cette station. Comme on l'a déjà dit, la comparaison internationale des données de qualité de l'air peut être compromise, en raison des différences sur les sites et sur le nombre des capteurs. Ainsi, bien que ces moyennes ne puissent être comparées dans leur valeur absolue, parce que ce sont des moyennes régionales en France et locales à Porto, elles permettent de constater que le comportement évolutif suivi par les stations MT et BV est inverse à celui enregistré dans les régions françaises considérées : on observe de façon évidente une tendance à l'augmentation des concentrations dans ces deux stations, après la décroissance généralisée en France.

Dans une analyse comparative des résultats dans plusieurs réseaux de pollution atmosphérique français, nord-américains et européens, on conclut que, relativement aux particules en suspension, on observe une décroissance des concentrations moyennes; il existe cependant des niveaux ponctuellement élevés dans des centres urbains, surtout dans des lieux exposés aux émissions des automobiles diesel [11]. Dans la décennie quatre-vingts, la décroissance des teneurs moyennes se généralise pour la plupart des villes et, dans cette période, des niveaux moyens annuels qui oscillent entre 54 et 104 $\mu\text{g m}^{-3}$ sont enregistrés dans les stations de mesure en Hollande, Grande-Breta-

gne, à Barcelone, Paris et Athènes. Quant au percentile 98, les valeurs maximales représentées pour les mêmes lieux et décennie, se situent entre une valeur maximale à Athènes de 310 $\mu\text{g m}^{-3}$ et une minimale de 150 $\mu\text{g m}^{-3}$ à Paris.

Les concentrations de FN en France n'indiquent pas une évolution claire dans le sens décroissant. La légère augmentation des teneurs après 1989 peut être associée à une période de sécheresse qui a prédominé de 1989 à 1990, ainsi qu'à la pollution transfrontière. Dans la période 1986-1992 les concentrations de 40 stations de mesures localisées dans cinq villes ont oscillé entre 20 et 30 $\mu\text{g m}^{-3}$ [13]. Dans l'année 1991/1992, la moyenne annuelle pour les zones urbaines a varié entre des niveaux inférieurs à 5 $\mu\text{g m}^{-3}$ dans certaines stations, jusqu'à 70 $\mu\text{g m}^{-3}$. Les valeurs du percentile 98 et les maximum journaliers pour la même période ont été comprises entre 10 et 230 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivement. Dans la région de Porto, à la fin de la décennie considérée, les valeurs du percentile 98 plus élevées correspondent à des mesures effectuées à la station ML, comme indiqué précédemment. Les moyennes annuelles et le percentile 98 ici enregistrées ont atteint des valeurs supérieures à 120 $\mu\text{g m}^{-3}$ et proches de 240 $\mu\text{g m}^{-3}$, respectivement. On rappellera pour mémoire qu'il s'agit d'une comparaison des moyennes régionales avec des moyennes locales. La comparaison des concentrations moyennes annuelles de cette station avec celles de certaines régions européennes (Fig. 17) montre des augmentations de niveaux de FN mesurés à la station ML et des croissances des teneurs sur les années 1988-1991. Comme mentionné ci-dessus, ceci démontre que les mesures de restriction de circulation éventuelles auraient un effet sur la qualité de l'air.

Les moyennes globales de Porto sont inférieures à celles de la station ML, se situant dans la gamme de concentrations obtenues à Paris. Il est pourtant nécessaire de rehausser les caractéristiques particulières du dispositif de mesure de la qualité de l'air à Porto, où la station ML est la seule station qui traduit réellement l'influence des émissions des véhicules automobiles, ce qui retire une importante signification à la moyenne globale. On peut donc conclure que, au contraire de ce qui se passe dans les pays étudiés, la ville de Porto manifeste encore une tendance vers l'augmentation des niveaux d'AF et FN.

Il convient de noter qu'aujourd'hui, dans d'autres pays, on observe une tendance généralisée à la baisse des concentrations de SO_2 et particules par suite des mesures réglementaires pour la défense de l'environnement. La réglementation portugaise de qualité de l'air est pareille à celle de la Communauté Européenne. Le retard en ce qui concerne l'action législative, particulièrement la fixation des normes et l'absence de stratégies et incitations fiscales pour l'application sévère de nor-

mes, pourraient expliquer les différences dans l'évolution des concentrations.

4.5. Concentration d'autres polluants en 1992

Pour le CO, après la comparaison des moyennes horaires maximales et minimales enregistrées à Paris et dans la station de la FEUP, on peut vérifier que les concentrations mesurées à la station portugaise sont nettement inférieures à celles enregistrées dans la capitale française (Tableau IV). Il est observé d'après l'analyse de la (Fig. 19) que les limites réglementées pour les moyennes maximales sont respectées. Cependant, les niveaux quotidiens dépassent largement les valeurs guides, comme on peut l'observer dans la figure 20.

Pour le NO, les concentrations horaires et journalières maximales enregistrées ont été respectivement de 516 et 126 $\mu\text{g m}^{-3}$. La concentration horaire maximale se situe en-dessous de celles mesurées dans les stations parisiennes. A Paris, la station avec le maximum horaire le plus faible a enregistré 600 $\mu\text{g m}^{-3}$ et la station la plus chargée a collecté un niveau proche de 1800 $\mu\text{g m}^{-3}$ (Fig. 21).

Pour le NO₂ mesuré en 1992 dans cette station, on observe que les valeurs recommandées par l'OMS ont été respectées (Tableau V). Les concentrations horaires maximales enregistrées dans la capitale française, à la même période, sont plus élevées que celles de la FEUP [16]. La figure 21 montre les valeurs maximales mesurées à la station de cette ville où l'on a vérifié le plus faible niveau (275 $\mu\text{g m}^{-3}$) et à la station la plus chargée (402 $\mu\text{g m}^{-3}$) [16].

Pour l'O₃, on peut vérifier que la concentration maximale sur 1 heure enregistrée à la station de Porto est inférieure à celles enregistrée dans d'autres pays, dépassant ainsi la valeur guide et celle recommandée par l'OMS. La concentration journalière dépasse également la valeur guide, bien que la plus grande partie des niveaux se situe en-dessous de cette valeur (Tableau VI).

Ainsi, en ce qui concerne les niveaux de monoxyde de carbone, oxydes d'azote et ozone, on conclut que les résultats de la FEUP sont inférieurs à ceux des régions de comparaison sélectionnées. Cependant, on ajoute que cette conclusion doit être prudemment généralisée, puisque les mesures d'une station ne peuvent pas permettre la caractérisation d'une ville.

5. CONCLUSION

On observe une tendance à l'augmentation des concentrations moyennes mensuelles d'AF et FN. La qualité de l'air met en évidence l'apport de l'activité industrielle et du trafic. On peut considérer généralement que les valeurs guides ont été dé-

passées en ayant des niveaux proches de la limite. On n'a pas enregistré d'épisodes aigus de pollution, mais on constate un aggravement de la qualité de l'air. Cette tendance est contraire à celle observée dans d'autres pays, où les niveaux d'AF et FN tendent à baisser grâce aux mesures de protection de l'environnement mises en pratique. Bien que la législation portugaise sur la qualité de l'air soit semblable à celle qui est adoptée dans la Communauté Européenne, une application moins rigoureuse, associée à une entrée en vigueur plus tardive pourrait expliquer l'augmentation des concentrations atmosphériques.

Sigles

AF	Acidité Forte
BV	Station d'échantillonnage localisée à Bo-Vista
CGA-AP	Commission de Gestion de l'Air dans la région de Porto (Comissao de Gestao do Ar da Area do Porto)
DGA	Direccao Geral do Ambiente
EP	Station d'échantillonnage localisée à Entre Paredes
F	Station d'échantillonnage localisée à la Faculté de Génie (Faculdade de Engenharia) sous gestion de CGA-AP
FEUP	Station d'échantillonnage localisée dans la Faculté de Génie de l'Université de Porto sous gestion de DGA
FN	Fumées Noires
FT	Station d'échantillonnage localisée à l'Ecole F. Torrinhã
GT	Station d'échantillonnage localisée à l'Ecole préparatoire Gomes Teixeira
LP	Station d'échantillonnage localisée à Leça da Palmeira
ML	Station d'échantillonnage localisée dans la rue Martires da Liberdade
MT	Station d'échantillonnage localisée à Matosinhos
PR	Station d'échantillonnage localisée à Pedras Rubras

Remerciements

Nous remercions la Direcção Gerale do Ambiente et la Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto d'avoir permis la réalisation de ce travail ainsi que la Junta Nacional de Investigação Científica e Technologica pour son appui.

