

Étude descriptive de la mesure de polluants atmosphériques dans l'agglomération de Marrakech

A descriptive study of atmospheric pollutants measurement in the Marrakech conurbation

Jamal OUARZAZI*, Mustapha TERHAZAZ**, Abdelkhalek ABDELLAOUI**,
Adelmounaim BOUHAFID*, Valérie NOLLET***, Jean-Claude DECHAUX***

Résumé

À l'aide du laboratoire mobile du Ministère de l'Environnement marocain, nous avons mené une campagne de mesures de polluants gazeux (SO_2 , NO, NO_2 , CO et O_3) dans la ville de Marrakech. Le camion laboratoire a mesuré également les paramètres météorologiques à 10 m d'altitude (température, pression, humidité, sens et vitesse du vent). Six stations ont été sélectionnées pour leur représentativité d'un type d'environnement urbain résidentiel, industriel, à trafic automobile important et propre à estimer le niveau de fond de pollution. Les concentrations de SO_2 et NO_2 ont été de plus déterminées chimiquement par les méthodes du tétrachloromercure (TCM) à la pararosaniline pour SO_2 et Griess-Saltzman pour NO_2 , sur les mêmes stations. Parallèlement à cette étude, nous avons procédé à des mesures de concentrations de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures totaux aux pots d'échappement des véhicules essence et d'opacité pour les véhicules diesel, circulant à Marrakech, en tenant compte du type, de l'âge et de la cylindrée des voitures. L'intérêt de cette dernière action est d'essayer de mettre en exergue l'état du parc automobile local. Les concentrations mesurées des polluants dans toutes les stations et leur répartition reflètent les caractéristiques économiques de la ville et témoignent d'un tissu industriel très faible et d'une densité du parc automobile assez importante.

Abstract

In November 2000, we carried out an air quality monitoring programme in Marrakech. A number of gaseous pollutants were measured. The study was constituted of three parts: (i) Levels of SO_2 , NO, NO_2 , CO and O_3 were determined using the mobile laboratory of Moroccan Ministry of the Environment. This laboratory, which measures climatic data (temperature, pressure, humidity, direction and wind speed) was placed in six locations each with specific characteristics – one residential, one industrial, three with intense traffic and one background reference. (ii) Concentrations of SO_2 and NO_2 were determined chemically by Tétrachloromercure (TCM) and Pararosaniline, and Griess-Saltzman method respectively at the same stations. (iii) Emissions of carbon monoxide and hydrocarbons from gasoline vehicles and exhaust-fume opacity from diesel vehicles were measured. Unfortunately, due to the lack of specific monitoring equipment, it was not possible to measure emissions from heavy vehicles and motorbikes. This shows the state of vehicles in Marrakech. The measuring concentrations of pollutants in all the stations and their distribution reflect the economic characteristics of the city, a very weak industrial issue and a rather important density of vehicles number.

* Université Cadi Ayyad, Laboratoire de Chimie Physique, Faculté des Sciences Semlalia, BP 511, Boulevard Prince My Abdellah 40000 Marrakech, Maroc. E-mail : ouarzazi@ucam.ac.ma

** Département de l'Environnement du Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Habitat, de l'Urbanisme et de l'Environnement, 36, rue Al Abtal Rabat, Maroc.

*** Laboratoire de Physico-Chimie des Processus de Combustion de l'Atmosphère, UMR 8522, Université des Sciences et Technologies de Lille, C11, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France.

E-mail : Valerie.Nollet@univ-lille1.fr

Introduction

La dégradation de la qualité de l'air et son impact sur la santé des populations sont considérés comme des problèmes majeurs de l'environnement, en milieu urbain. Les villes marocaines qui connaissent un trafic routier intense, un vieillissement accentué du parc automobile caractérisé par un manque d'entretien et une industrialisation accélérée, n'échappent pas à ces problèmes. La ville de Marrakech n'est pas une ville à caractère industriel marqué ; elle subit fortement les effets des polluants issus des échappements des véhicules automobiles. Les principales sources de pollution atmosphérique sont donc les sources anthropiques et tout particulièrement les véhicules à moteur. Précisons que c'est la première fois que ce genre d'étude est réalisé à Marrakech. Elle constitue la première base de données de mesures de polluants de l'air et a été réalisée dans le but de mettre en œuvre par la suite un projet de plus grande envergure d'élaboration de cadastre et de modélisation eulérienne de la qualité de l'air dans l'agglomération.

La deuxième partie montre la problématique de la ville avec les facteurs qui définissent le contexte général pour une meilleure compréhension de l'état de la pollution à Marrakech.

La troisième partie présente les méthodes de mesures employées, les normes de la qualité de l'air utilisées comme référence pour les résultats et une description des caractéristiques des stations de mesure.

La quatrième partie présente les résultats de l'étude sur les émissions des véhicules automobiles.

Notre étude a pour objectif d'offrir un diagnostic sur l'état de la qualité de l'air à Marrakech. Elle met en évidence les principales sources de pollution atmosphérique et montre l'état du parc automobile dans cette ville. En conclusion, nous proposons des recommandations à même de permettre de diminuer les émanations gazeuses en atmosphère.

Présentation de la problématique de la ville de Marrakech

La géographie et la topographie

À une latitude de 31° 37' Nord et une longitude de 8° 02' Ouest [1], la ville de Marrakech est située dans la plaine du Haouz (sud du Maroc) à une altitude de 463,53 m, enserrée par le massif du Haut-Atlas au Sud, celui des Jbilettes au Nord, et à l'Est par la terminaison occidentale du Moyen-Atlas, et qui s'étend sur une superficie de 170 km². Le site de Marrakech est une plaine uniforme s'inclinant doucement selon une pente d'environ 8 % orientée du sud-est vers le nord-ouest sur 180 km. Les seuls reliefs sont constitués par des collines au nord.

Le climat

Précipitations et hygrométrie

La zone de Marrakech se situe dans l'étage bioclimatique semi-aride caractérisé par des précipi-

tations peu abondantes, groupées pendant la saison froide, du mois de septembre au mois de mai. Soulignant la sécheresse du climat, l'humidité relative passe en moyenne de 73 % en janvier à 33 % en juillet [2]. Durant ce dernier mois, elle peut s'annuler lorsque soufflent des vents desséchants : chergui et sirocco. Cette dernière décennie a connu une sécheresse très intense.

Pendant toute la période d'étude, les températures minimales et maximales ont varié de 7 °C la nuit à 28 °C le jour.

Vents

Les vents dominants sont calmes et originaires de l'ouest et du nord-ouest. Les vents desséchants chergui et sirocco, soufflent respectivement de l'est et du sud, avec une durée cumulée dans l'année de 39 jours centrée sur le mois de juillet.

La population de Marrakech

L'accroissement démographique de la région de Marrakech serait dû principalement à l'évolution de la population urbaine suite à l'exode rural.

Les projections de la population de la région de Marrakech établies par la Direction de la Statistique pour l'an 2000, sont portées sur le tableau 1.

Tableau 1.
Population pour l'an 2000.
Year 2000 population.

Préfecture	Nombre	Densité (hab/km ²)
Marrakech-Ménara	519 000	4 942
Marrakech-Médina	184 000	28 750
Sidi Youssef Ben Ali	291 000	4 157
Total	994 000	

La consommation de combustibles

Tableau 2.
Quantité (en tonnes) de combustibles pétroliers consommés lors de la période d'étude dans l'agglomération de Marrakech [3].

Quantity (tons) of various petrol fuels consumed in the urban area of Marrakech at the time of this study [3].

Combustible	Super	Ordinaire	Pétrole lampant
Quantité	1 558,1	854,6	162,1
Combustible	Gasoil	Lubrifiants	Butane
Quantité	8 253,1	141,9	3 018,8
Combustible	Propane	Fuel	
Quantité	48,6	699,8	

Le nombre de véhicules circulant à Marrakech (2000)

Durant les 30 dernières années, le parc national des véhicules a connu une progression remarquable, il est passé de 306 359 unités en 1970 à 1 584 066 unités en 2000. Ce chiffre comprend, les motos, les voitures de tourisme et l'ensemble des véhicules utilitaires. Le nombre de véhicules en circulation journalière à Marrakech est estimé à 24 000 [4] dont 62,5 % de véhicules diesel et 37,5 % de véhicules fonctionnant à l'essence.

Tableau 3.
Répartition par type de véhicule circulant à Marrakech [4].
Apportionment of the vehicles in Marrakech city [4].

Type de véhicule	Pourcentage
Tourisme	70,5
Camions et camionnettes	25,6
Moto	2,6
Ambulance	1,3
Autres	0,1

Inventaire des émissions de polluants

Matériel utilisé

Les prélèvements et les analyses sont réalisés selon les normes de l'Organisation internationale de normalisation (ISO). Les méthodes utilisées sont soit basées sur des analyses chimiques, soit effectuées à l'aide d'analyseurs automatiques.

Les analyses chimiques sont réalisées pour le dosage du dioxyde de soufre SO_2 par la méthode au tétrachloromercurate (TCM) [5] et à la pararosaniline

et pour le dosage du dioxyde d'azote NO_2 par la méthode de Griess-Saltzman [6].

Tous les analyseurs automatiques utilisés pour les mesures des concentrations des polluants de l'air sont de type Horiba.

L'analyseur équipant le laboratoire mobile utilisé pour les mesures des NO_x est basé sur la réaction de chimiluminescence entre le NO et le O_3 . Celui de SO_2 est basé sur la fluorescence UV. L'analyseur de CO utilise le principe de l'infrarouge. Celui de O_3 est basé sur l'absorption en utilisant la loi de Beer-Lambert qui relie l'absorption à la concentration en ozone.

Normes de qualité de l'air

Les normes de la qualité de l'air du projet de décret pour l'application de la loi sur la protection de l'atmosphère au Maroc [7] (Tableau 4) en comparaison des normes de l'OMS sont considérées comme base de référence pour interpréter les résultats obtenus lors de cette étude.

Campagne de mesures des polluants atmosphériques

Les lieux des stations de mesures retenus, répartis sur toute la ville, diffèrent par l'intensité de la pollution. Nous avons tenu à évaluer les taux de ces polluants par type de localité.

Cette distribution spatiale des stations a été, entre autres, motivée par la volonté de l'utiliser, à la lumière des résultats obtenus, comme base de réflexion pour l'installation d'un éventuel réseau permanent de mesure.

Les caractéristiques des stations de mesure sélectionnées sont les suivantes :

– « **stations urbaines de fond** » : les mesures sont effectuées loin des sources et de toute micrométéoro-

Tableau 4.
Projets de normes marocaines de la qualité de l'air et de l'Organisation mondiale de la santé.
Projects of the Moroccan and WHO air quality standards.

	Normes marocaines	Normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) [8]
SO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 : valeur moyenne sur une année* 200 : valeur moyenne sur une année pour le percentile 95** 400 : valeur moyenne sur une demi-heure***	50 : valeur moyenne sur une année 125 : valeur moyenne sur 24 heures 500 : valeur moyenne sur 10 minutes
NO_2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 : valeur moyenne sur une année* 200 : valeur moyenne sur une année pour le percentile 95** 400 : valeur moyenne sur une demi-heure***	40 : valeur moyenne sur une année 200 : valeur moyenne sur une heure
CO (mg/m^3)	10 : valeur moyenne sur une année* 30 : valeur moyenne sur une année pour le percentile 95** 60 : valeur moyenne sur une demi-heure***	10 : valeur moyenne sur huit heures 30 : valeur moyenne sur une heure 60 : valeur moyenne sur 30 minutes 100 : valeur moyenne sur 15 minutes
O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	100 : valeur moyenne sur 8 heures	120 : valeur moyenne sur huit heures

* Moyenne arithmétique des valeurs semi-horaires mesurées pendant une année.

** 95 % des moyennes semi-horaires d'une année doivent être inférieures à cette valeur.

*** Valeurs limites semi-horaires à ne jamais dépasser.

logie locale. Les indicateurs mesurés sont caractéristiques des phénomènes globaux et les teneurs observées ont une représentativité géographique sur un secteur (de l'ordre de 1 km² ou moins dans les zones à forte densité de population exposée). Ce type de station réalise le suivi de l'exposition moyenne, de longue durée, pour l'ensemble de la population ;

– « **stations de proximité** » : les mesures sont effectuées près des sources automobiles, sur les trottoirs où est exposée la population piétonne. Les indicateurs mesurés sont ceux de la pollution primaire d'origine automobile. Les stations ont une représentativité topographique (rue, avenue, boulevard périphérique, route nationale de banlieue, grande place urbaine, etc.). Les niveaux observés sont caractéristiques de l'exposition courte pour l'ensemble de la population, ou plus longue pour des catégories particulières (gardiens de la paix, agents de la voirie, coursiers, taxis et automobilistes dans le trafic) ;

– **station de référence** : c'est une station située dans un environnement dit « propre » loin des sources de polluants primaires et hors trajectoire des vents dominants. Ce type de station nous permet de disposer du niveau de fond en terme de pollution, à savoir les concentrations en polluants d'un air propre.

Deux stations complémentaires, « Bab Doukala (S5) » et « 16 novembre (S6) », nous permettent d'acquérir des données supplémentaires très utiles en vue de compléter le maillage du terrain.

La station « Bab Doukala (S5) » est un feu rouge en plein centre-ville à proximité de la gare routière et du marché de gros de fruits et légumes. Le trafic routier y est très intense.

La station « 16 novembre (S6) » est un carrefour situé sur un axe routier emprunté, en absence de route périphérique dans la ville, par tous les véhicules à destination des villes d'Agadir et Essaouira en provenance des villes de Fès et Ouarzazate et dans l'autre sens. Cette circulation est intensifiée par

l'activité routière locale car ce carrefour est situé également sur le grand boulevard liant la ville nouvelle à Marrakech intra-muros (le vieux Marrakech).

Programmes des mesures automatiques et manuelles

La ville de Marrakech ne dispose pas de réseau permanent de mesures de polluants atmosphériques ; nous avons utilisé le laboratoire mobile de notre Ministère de l'Environnement successivement sur les stations de mesures, selon l'agenda qui figure dans le tableau 5.

En parallèle aux mesures automatiques, nous avons effectué des prélèvements manuels quotidiennement et sur chaque station, que nous avons traités au laboratoire selon les méthodes du tétrachloromercure (TCM) à la pararosaniline pour SO₂ et Griess-Saltzman pour NO₂.

Les durées du prélèvement par échantillon sont d'une heure pour NO₂ et d'une demi-heure pour SO₂. Par jour, nous avons prélevé 7 échantillons pour NO₂ et 14 pour SO₂, en vue de couvrir une durée de 7 heures dont 2 la nuit.

Au niveau de la place Jamaa El Fna (S2), le laboratoire mobile a été placé à proximité d'un feu rouge. Cette place est classée par l'UNESCO, comme patrimoine universel depuis 1985 et chef-d'œuvre du patrimoine oral et immatériel de l'humanité depuis avril 2001.

Interprétation des résultats

Ozone

L'ozone est naturellement présent dans l'atmosphère. La photolyse du dioxyde d'azote dans la troposphère produit en effet un atome d'oxygène qui réagit avec le dioxygène de l'air pour former de l'ozone :

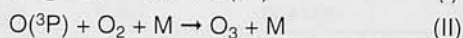
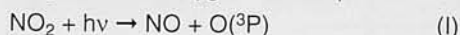
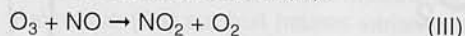


Tableau 5.
Choix des stations de mesure.

The choice of environment air quality measurement stations.

Station de mesure	Période de mesure	Caractéristique de la station
Azli Massira (S1)	8 au 13 novembre 2000	Station située dans le quartier industriel
Place Jamaa El Fna (S2) Grande place urbaine	14 au 20 novembre 2000	Station de proximité à forte circulation automobile
Palmeraie (S3)	21 au 26 novembre 2000	Station de référence loin des sources de pollution
École Mohammed V Bab Ghmat Médina (S4)	27 novembre au 3 décembre 2000	Station de fond à caractère résidentiel
Bab Doukala (S5)	4 au 5 décembre 2000	Station de proximité à forte circulation automobile (station complémentaire)
Place 16 novembre Guéliz (S6)	6 décembre 2000	Station de proximité à forte circulation automobile (station complémentaire)

Où M représente un partenaire de collision, O_2 ou N_2 qui absorbe l'excès d'énergie vibrationnelle et donc stabilise la molécule d'ozone formée. Le monoxyde d'azote produit par la réaction (I) réagit rapidement avec l'ozone pour régénérer le dioxyde d'azote et fermer le cycle (III) :



L'ozone (O_3) et autres oxydants photochimiques se trouvant dans l'air ambiant, tel que le peroxyacétylnitrate (PAN) et le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), sont le résultat d'un ensemble de réactions chimiques impliquant deux classes de polluants précurseurs, les composés organiques volatils (COV) et les oxydes d'azote (NO_x). La formation de l'ozone et autres oxydants à partir de ces précurseurs est complexe ; c'est une fonction non linéaire de nombreux facteurs, incluant la température, l'intensité et la diffusion spectrale de la lumière du soleil, le mélange atmosphérique, les conditions météorologiques, les concentrations de précurseurs dans l'air ambiant.

Nous avons obtenu des concentrations d'ozone plus élevées dans les deux stations Palmeraie (S3) et Bab Ghmat (S4) que sur la place Jamaa El Fna (S2) et à Azli (S1) comme le montre la figure 1 qui présente les moyennes journalières de O_3 sur toute la période de mesures dans chacune des stations.

En zone non polluée, telle que la station Palmeraie (S3) située à 7 km du centre-ville, les précurseurs de l'ozone sont issus principalement du transport longue distance et sont présents en faible quantité comme

on peut le voir sur la figure 2, p. 142, dans le cas des oxydes d'azotes.

En zone urbaine, les émissions de précurseurs sont importantes : les hydrocarbures et les oxydes d'azote sont donc présents en grande quantité. Beaucoup d'ozone se formera mais, celui-ci réagira, une fois formé, avec le monoxyde d'azote dont l'apport est constant.

L'ozone sera donc consommé au niveau de l'agglomération et généralement présent en faible quantité.

En s'éloignant de la ville mais en restant sous son panache, la quantité de précurseurs émis va diminuer. L'ozone ne réagira plus avec le monoxyde d'azote alors que l'ensemble des autres réactions vont se poursuivre lors du déplacement des masses d'air. Ici la concentration en ozone va augmenter car l'ozone formé n'est plus détruit comme dans le cas précédent. Le maximum d'ozone est obtenu entre quatre et six heures après l'émission des précurseurs expliquant ainsi pourquoi les pics d'ozone obtenus sont loin des lieux d'émission.

L'ozone est donc présent en quantité plus importante dans les zones suburbaines et rurales sous le panache de l'agglomération.

Sur la base des normes préconisées par l'OMS, on peut voir (Figure 3, p. 142) que les mesures réalisées présentent des pics de concentrations semi-horaires d'ozone les 21, 22 et 25 novembre 2000, dont le plus élevé atteint $124 \mu g/m^3$ le 22-11-2000, à

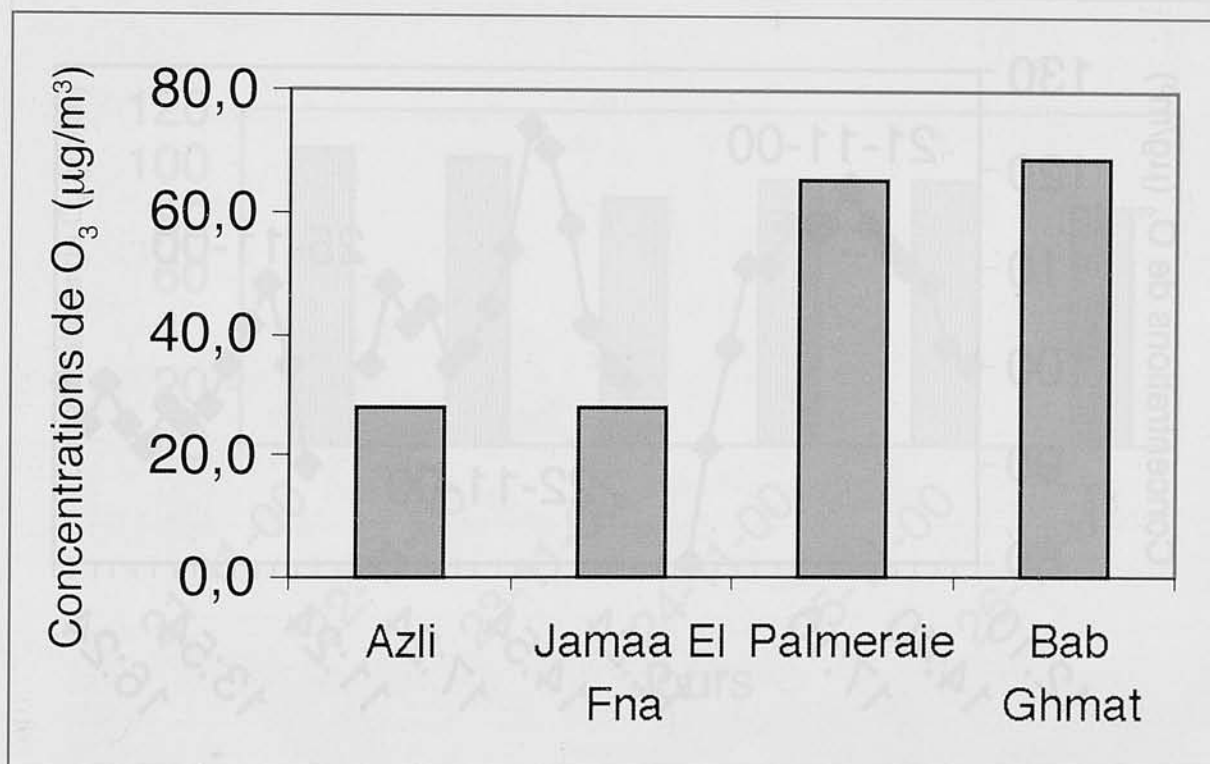


Figure 1.
Concentrations journalières moyennes de O_3 par station ($\mu g/m^3$).
Daily mean ozone concentration ($\mu g/m^3$) at various stations.

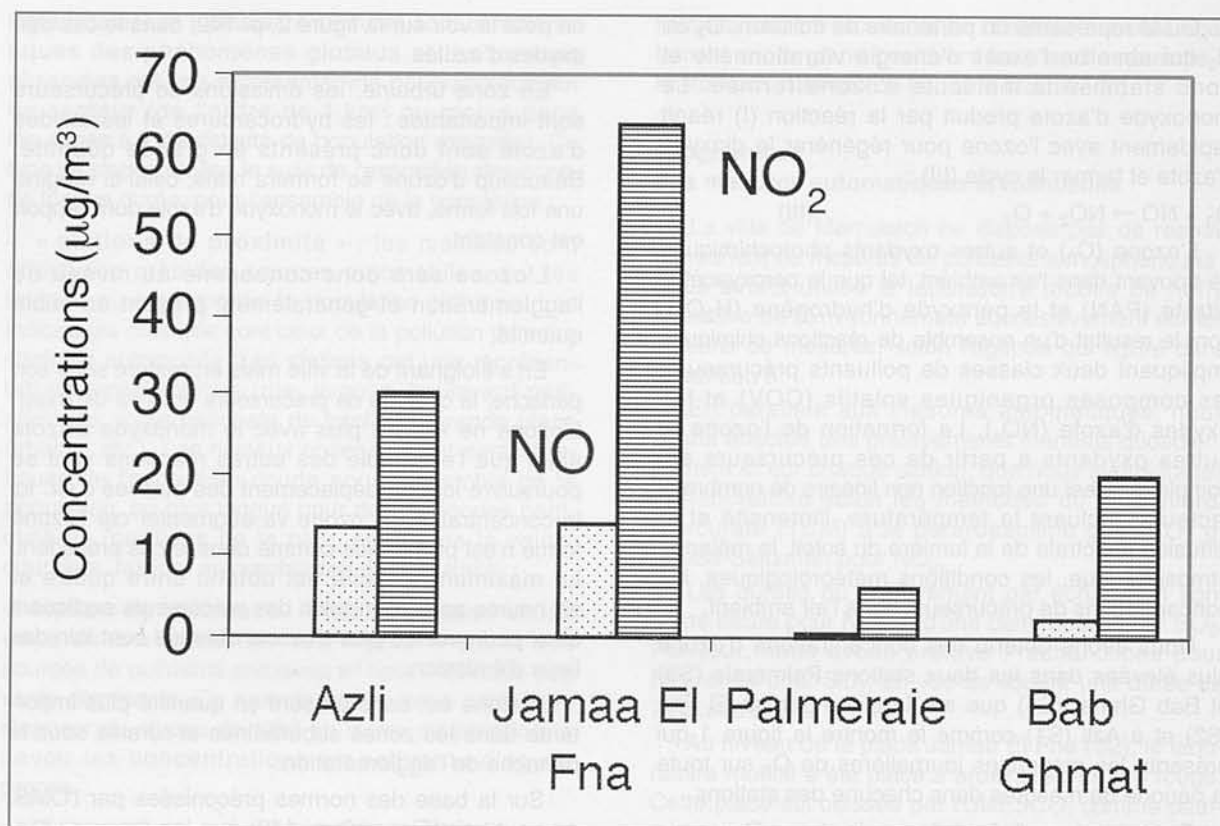


Figure 2.
Concentrations journalières moyennes de NO et NO₂ par station (µg/m³).
NO and NO₂ daily mean concentrations (µg/m³) at various stations.

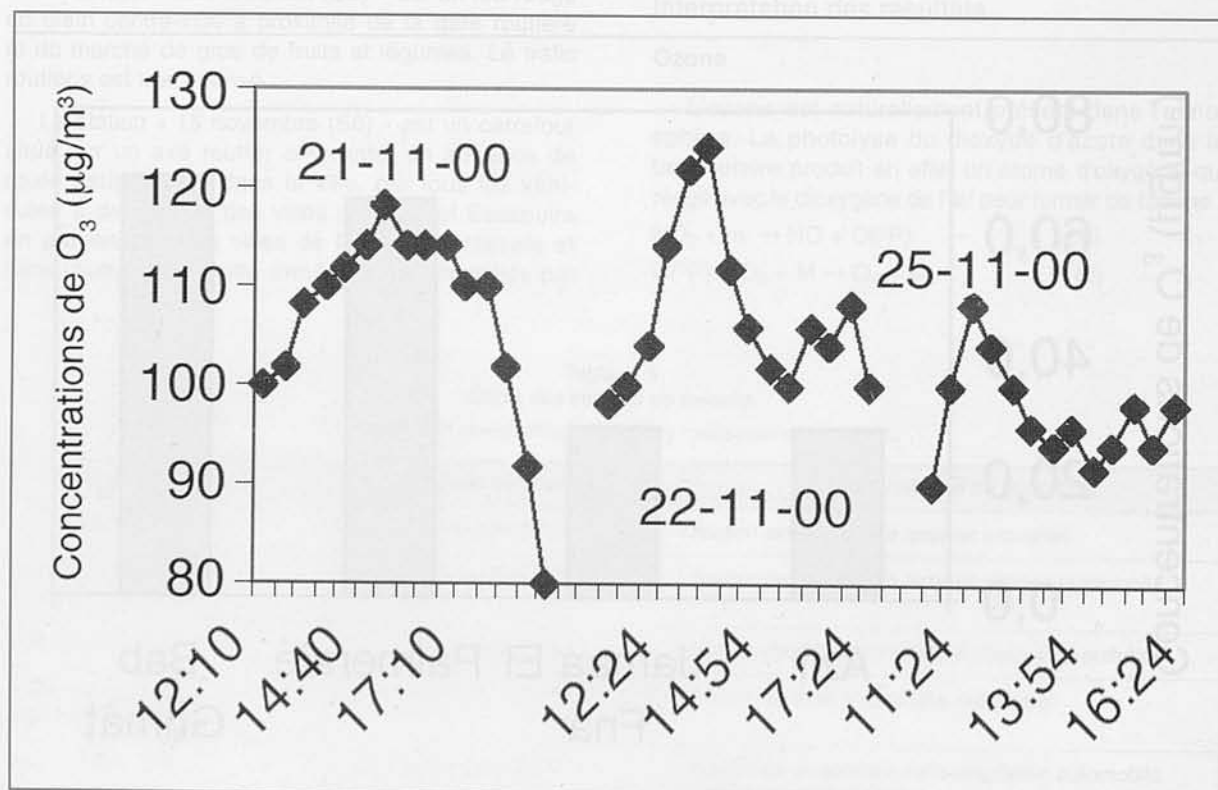


Figure 3.
Concentrations semi-horaires d'ozone pour les journées des 21, 22 et 25-11-2000 (µg/m³).
Half hourly ozone concentration (µg/m³) on 21, 22 and 25th November, 2000.

13 h 24. Ces valeurs restent à l'évidence bien en deçà des normes de référence qui recommandent la valeur de $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur huit heures. Les autres jours enregistrent des concentrations en O_3 plus faibles.

La figure 4 montre que les moyennes des concentrations d'ozone au niveau de la station Palmeraie (S3) sur huit heures variant de 10 h 30 à 18 h 30, durée de présence importante d'ozone dans l'atmosphère, sont toutes situées en deçà des normes de l'OMS de l'an 2000.

L'ozone est produit à partir des précurseurs NO_x et COV sous l'action de la lumière solaire, ceci est mis en évidence par les figures 5 et 6. Nous constatons que pour la journée du 15-11-2000 (Figure 5, p. 144) pendant laquelle le ciel était continuellement nuageux, les concentrations de O_3 et de NO_2 sont restées pratiquement constantes et augmentent en fonction du trafic routier, contrairement à la journée ensoleillée du 16-11-2000 (Figure 6, p. 144 qui montre qu'entre midi et 16 h 30 il y a une chute de NO_2 et une augmentation de O_3).

NO_x

Dans la basse troposphère, les oxydes d'azote contribuent à la formation d'ozone et d'autres polluants photochimiques. Le monoxyde d'azote tout comme le monoxyde de carbone sont généralement connus comme étant des polluants traceurs de la pollution automobile. Ce sont les polluants les plus sensibles à l'intensité du trafic.

Le NO est un polluant primaire produit principalement par les processus de combustion à haute température. Le NO_2 est formé par action de O_3 sur NO. Les principales sources d'oxydes d'azote sont les transports, les sources stationnaires de combustion, divers procédés industriels, les décharges publiques et l'ensemble des activités reliées à la combustion. La figure 7, p. 145, montre que les concentrations les plus élevées de NO_x sont enregistrées au niveau de la station Jamaa El Fna (S2). Les variations des concentrations d'une station à l'autre respectent la nature de chacune d'entre elles en terme d'intensité du trafic routier.

Sur la figure 8, p. 145, nous constatons que les journées du 18 au 20 novembre 2000 enregistrent les concentrations semi-horaires les plus élevées de NO_2 . Les valeurs de ces concentrations n'atteignent jamais $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ qui correspond à la norme moyenne de l'OMS pour une heure.

SO_2

Près des axes urbains de circulation, la pollution par le dioxyde de soufre est en relation avec les pics de trafic routier. SO_2 est le composé soufré le plus émis dans l'atmosphère par les sources anthropiques.

La figure 9, p. 146, montre que la concentration journalière moyenne la plus importante de SO_2 est enregistrée au niveau de la place Jamaa El Fna (S2), qu'elle est quasiment nulle sur la station de référence

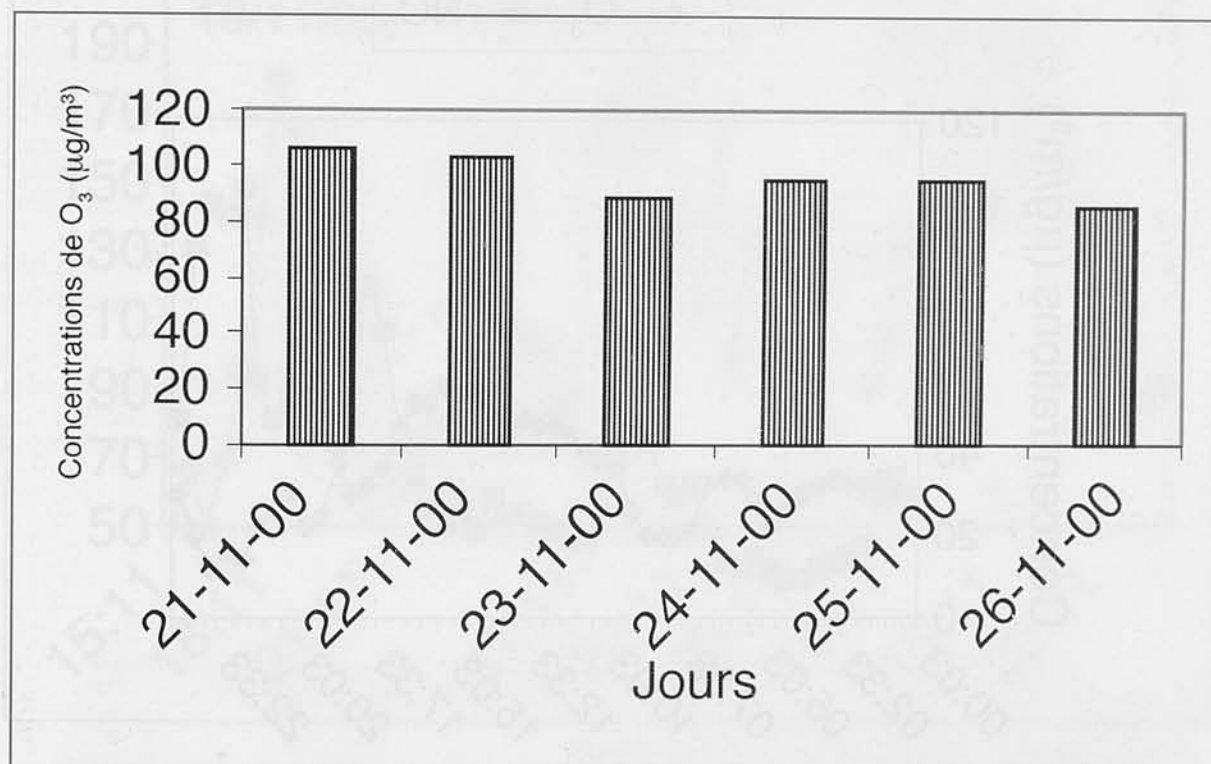


Figure 4.
Concentrations moyennes de O_3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) sur huit heures dans la station de la Palmeraie.
Mean height hours ozone concentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) at the Palmeraie station.

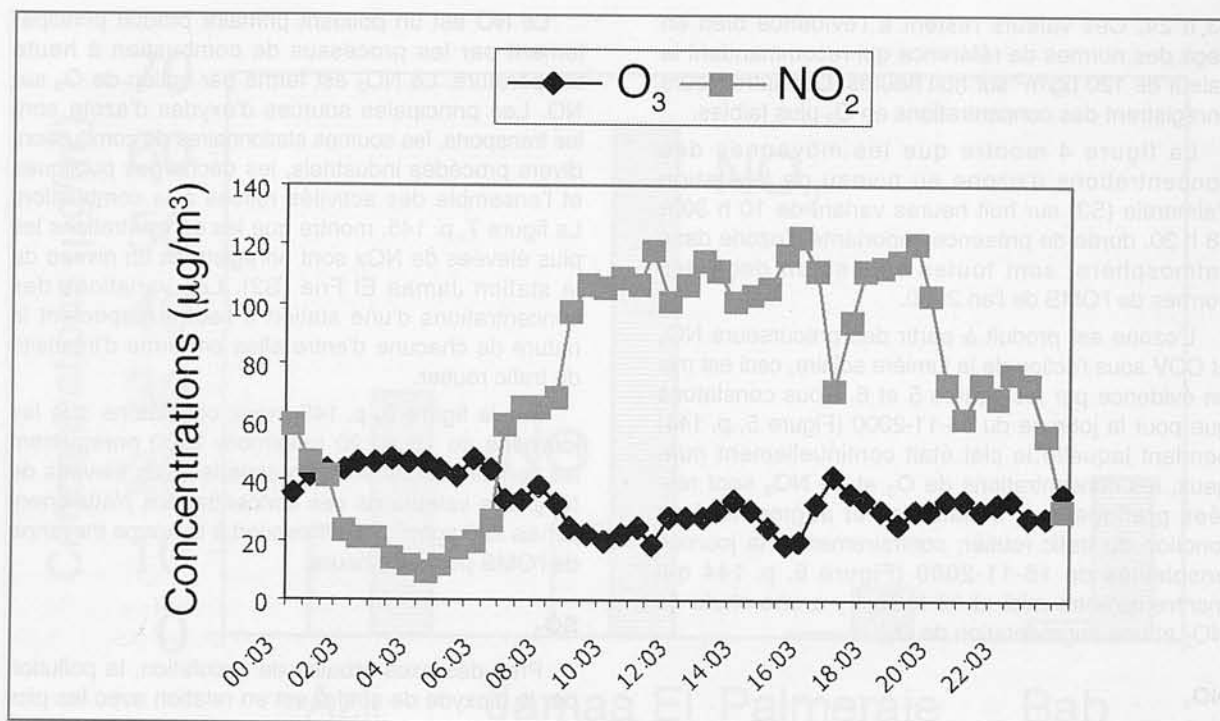


Figure 5.

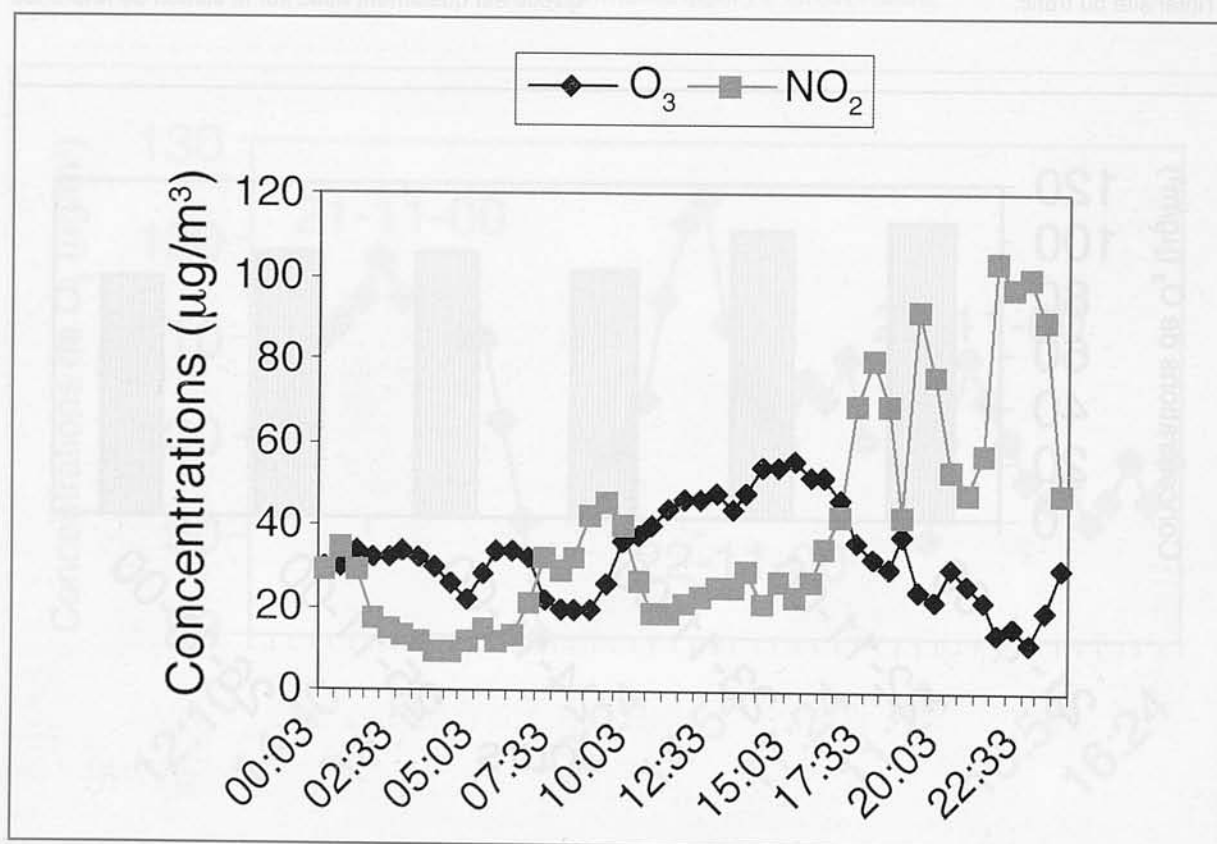
Concentrations moyennes semi-horaires de O_3 et NO_2 ($\mu g/m^3$) du 15-11-2000.Half hourly ozone and NO_2 mean concentration ($\mu g/m^3$) on 15th November, 2000.

Figure 6.

Concentrations moyennes semi-horaires de O_3 et NO_2 ($\mu g/m^3$) du 16-11-2000.Half hourly ozone and NO_2 mean concentration ($\mu g/m^3$) on 16th November, 2000.

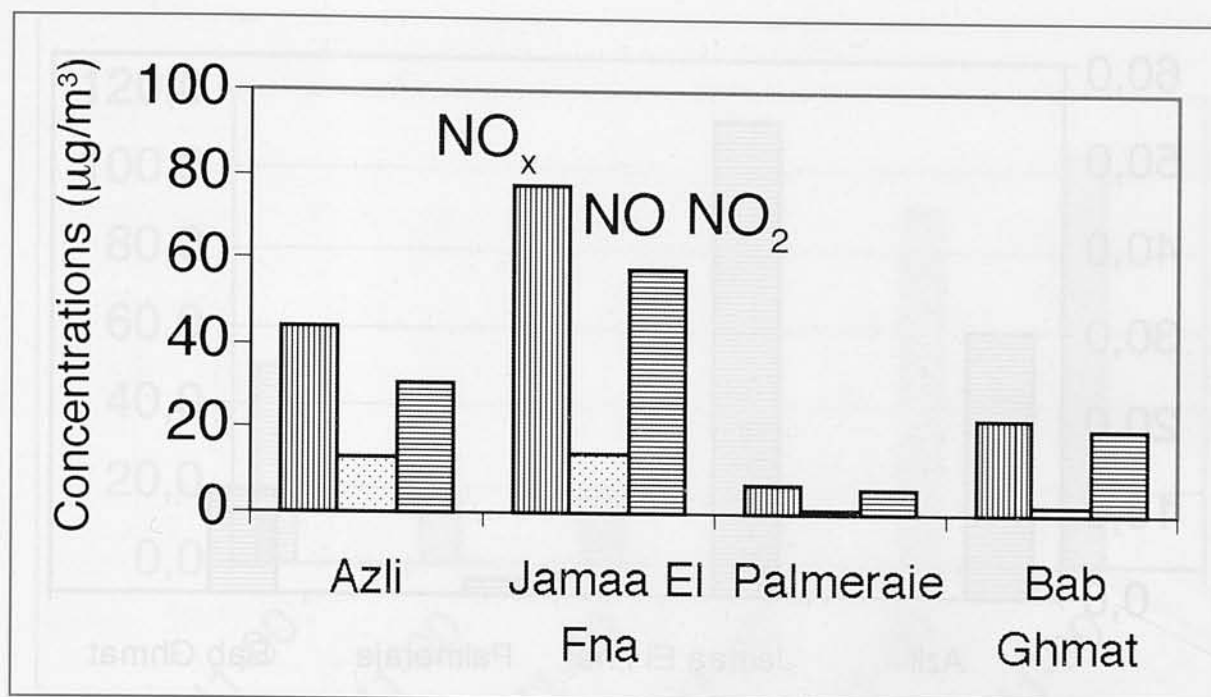


Figure 7.
Concentrations journalières moyennes de NO, NO₂ et NO_x par station (µg/m³).
Daily mean NO, NO₂ and NO_x concentration (µg/m³) for the various stations.

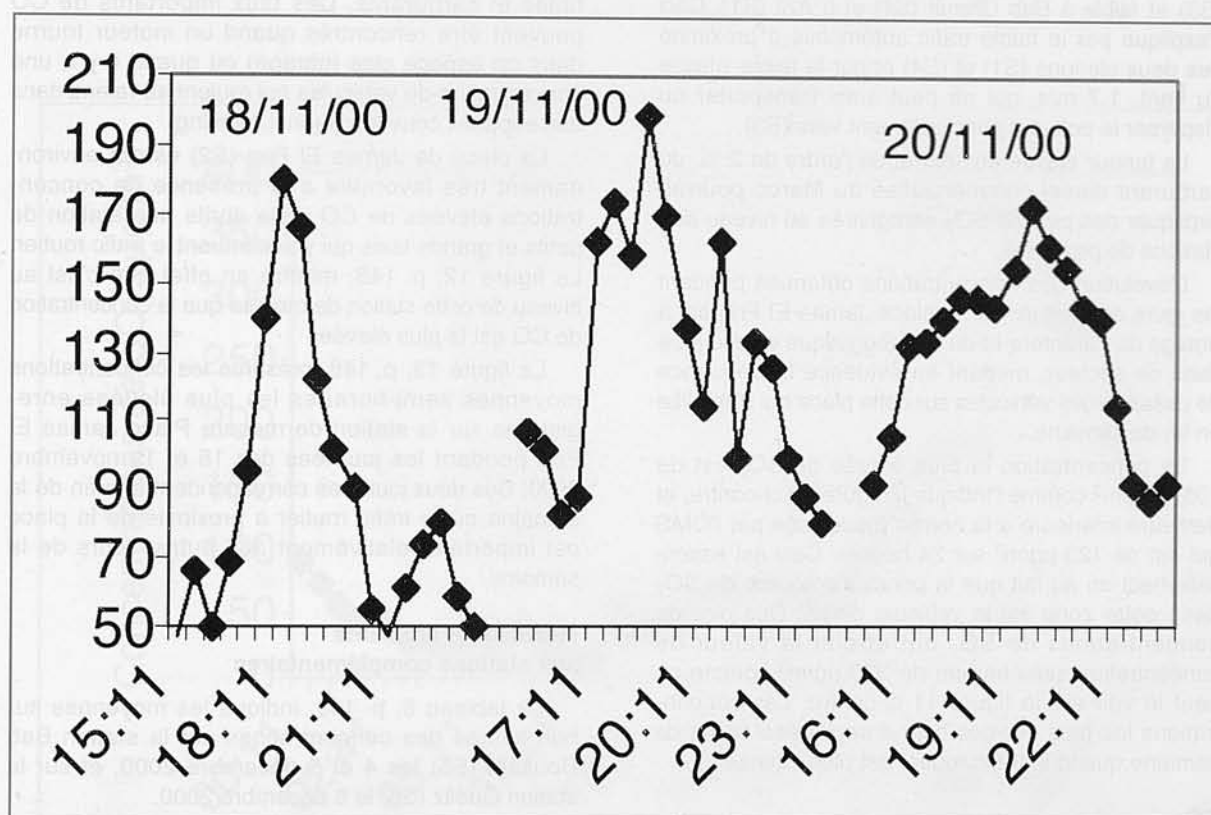


Figure 8.
Concentrations semi-horaires de NO₂ pour les 18, 19 et 20 novembre 2000 (µg/m³) dans la station Jamaa El Fna.
Half hourly NO₂ concentrations (µg/m³) on November 18, 19 and 20th, 2000, at the Jamaa El Fna station.

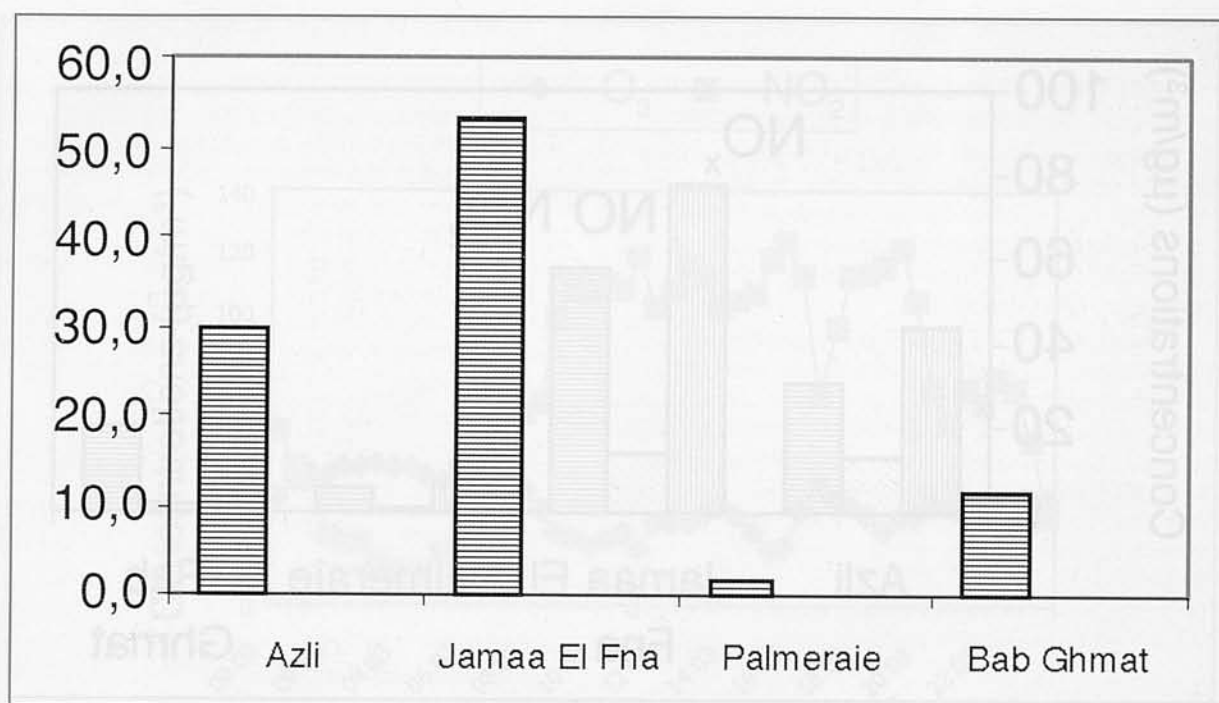


Figure 9.
Concentrations journalières moyennes de SO_2 par station ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).
Daily mean SO_2 concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) at the various stations.

(S3) et faible à Bab Ghmat (S4) et à Azli (S1). Ceci s'explique par le faible trafic automobile à proximité des deux stations (S1) et (S4) et par la faible vitesse du vent, 1,7 m/s, qui ne peut ainsi transporter ou disperser le polluant principalement vers (S3).

La teneur élevée en soufre, de l'ordre de 2 %, du carburant diesel commercialisé au Maroc pourrait expliquer ces pics de SO_2 enregistrés au niveau des stations de proximité.

L'évolution des concentrations obtenues pendant les jours de mesure sur la place Jamaa El Fna est à l'image du caractère et du rôle touristique qu'elle joue dans ce secteur, mettant en évidence la fréquence de passage des véhicules sur cette place qui s'amplifie en fin de semaine.

La concentration la plus élevée de SO_2 est de $105,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ comme l'indique la figure 10 ci-contre, et demeure inférieure à la norme préconisée par l'OMS qui est de $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sur 24 heures. Ceci est essentiellement dû au fait que la principale source de SO_2 dans cette zone est le véhicule diesel. Des pics de concentrations de SO_2 ont atteint la valeur de concentration semi-horaire de $370 \mu\text{g}/\text{m}^3$ comme on peut le voir sur la figure 11 ci-contre. Les concentrations les plus élevées sont enregistrées en fin de semaine quand le trafic routier est plus intense.

CO

Ce polluant est un indicateur du trafic automobile, principalement dans une ville comme Marrakech qui ne possède pas de grande sources industrielles. Il provient de la combustion incomplète des combus-

tibles et carburants. Des taux importants de CO peuvent être rencontrés quand un moteur tourne dans un espace clos (garage) ou quand il y a une concentration de véhicules qui roulent au ralenti dans des espaces couverts (tunnel, parking).

La place de Jamaa El Fna (S2) est un environnement très favorable à la présence de concentrations élevées de CO ; elle abrite une station de petits et grands taxis qui y accentuent le trafic routier. La figure 12, p. 148, montre en effet que c'est au niveau de cette station de mesure que la concentration de CO est la plus élevée.

La figure 13, p. 148, présente les concentrations moyennes semi-horaires les plus élevées enregistrées sur la station de mesure Place Jamaa El Fna pendant les journées des 18 et 19 novembre 2000. Ces deux journées correspondent à la fin de la semaine où le trafic routier à proximité de la place est important relativement aux autres jours de la semaine.

Mesures de polluants aux stations complémentaires

Le tableau 6, p. 149, indique les moyennes sur huit heures des concentrations sur la station Bab Doukala (S5) les 4 et 5 décembre 2000, et sur la station Guéliz (S6) le 6 décembre 2000.

Étude d'émission des gaz d'échappement

Précédant l'entrée en vigueur de la nouvelle réglementation sur les gaz d'échappement et préparant

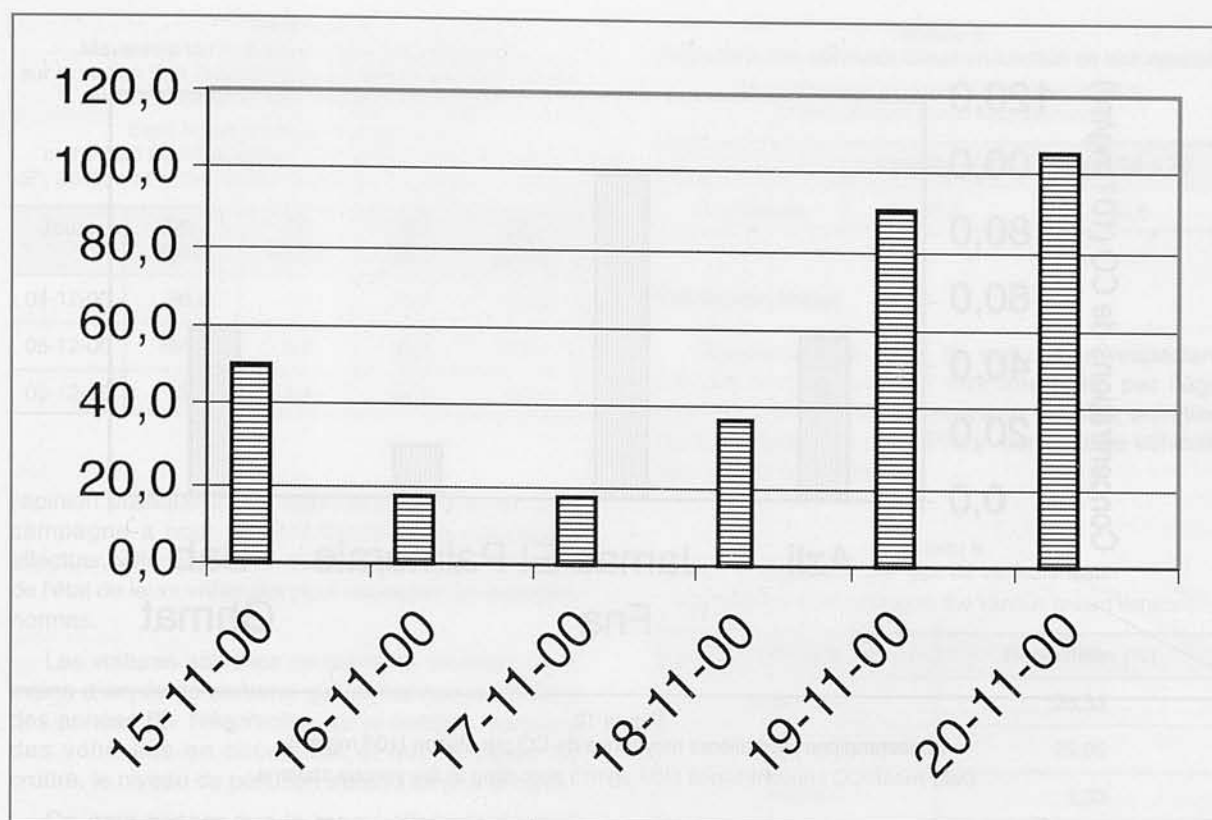


Figure 10.
Concentrations moyennes sur 24 heures de SO₂ sur la station Jamaa El Fna (µg/m³).
24 hour mean SO₂ concentrations (µg/m³) at the Jamaa El Fna station.

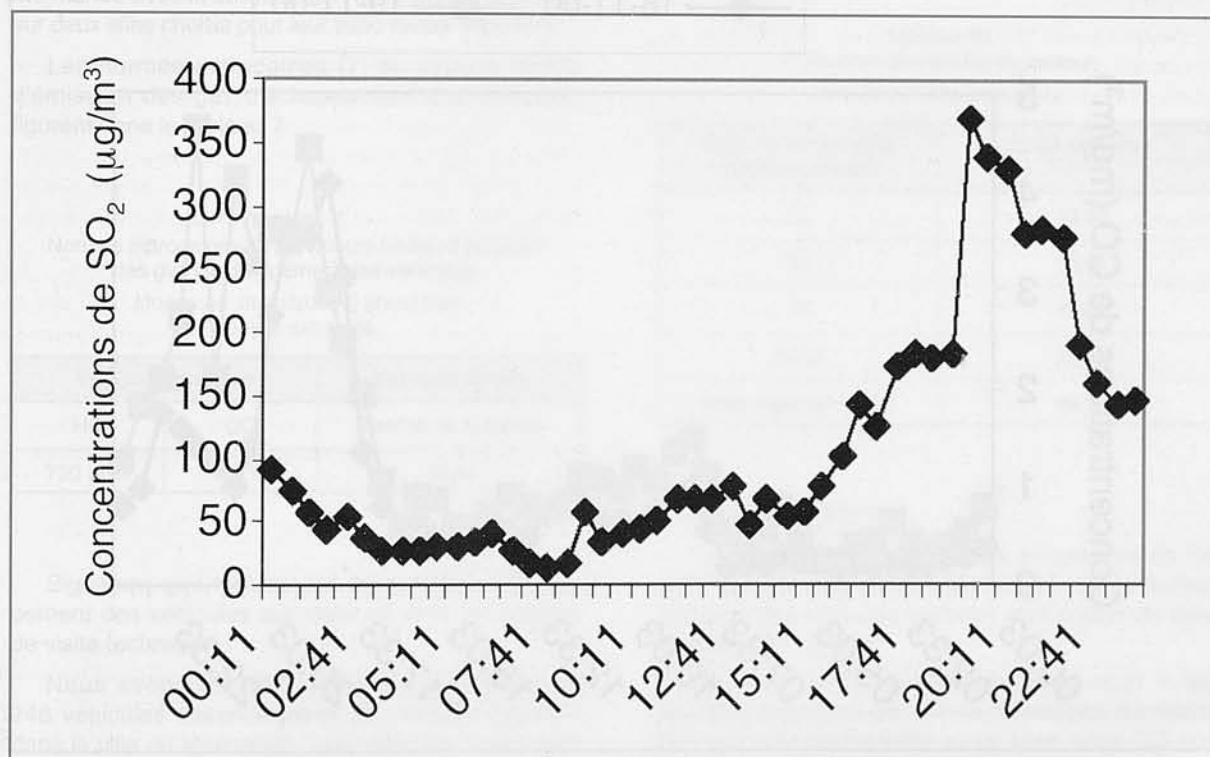


Figure 11.
Concentrations semi-horaires de SO₂, le 20-11-2000 (µg/m³), dans la station Jamaa El Fna.
Half hourly SO₂ concentrations (µg/m³) on November 20th, 2000, at the Jamaa El Fna station.

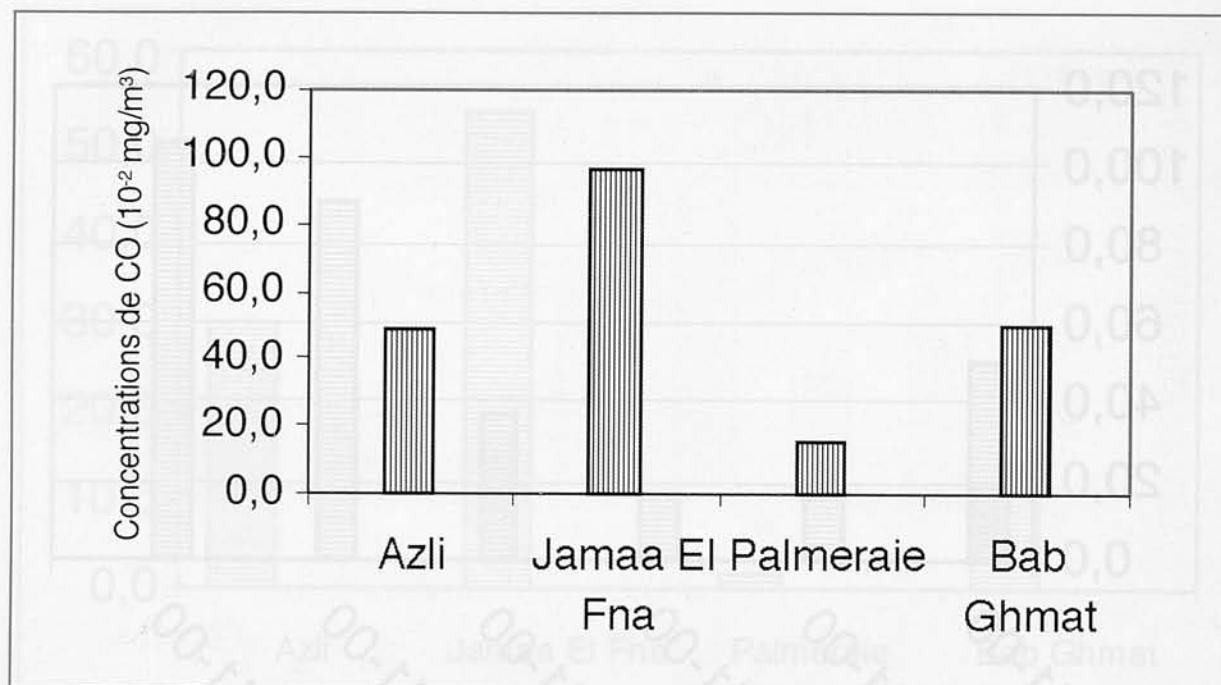


Figure 12.
Concentrations journalières moyennes de CO par station (10⁻² mg/m³).
Daily mean CO concentrations (10⁻² µg/m³) according to the various stations.

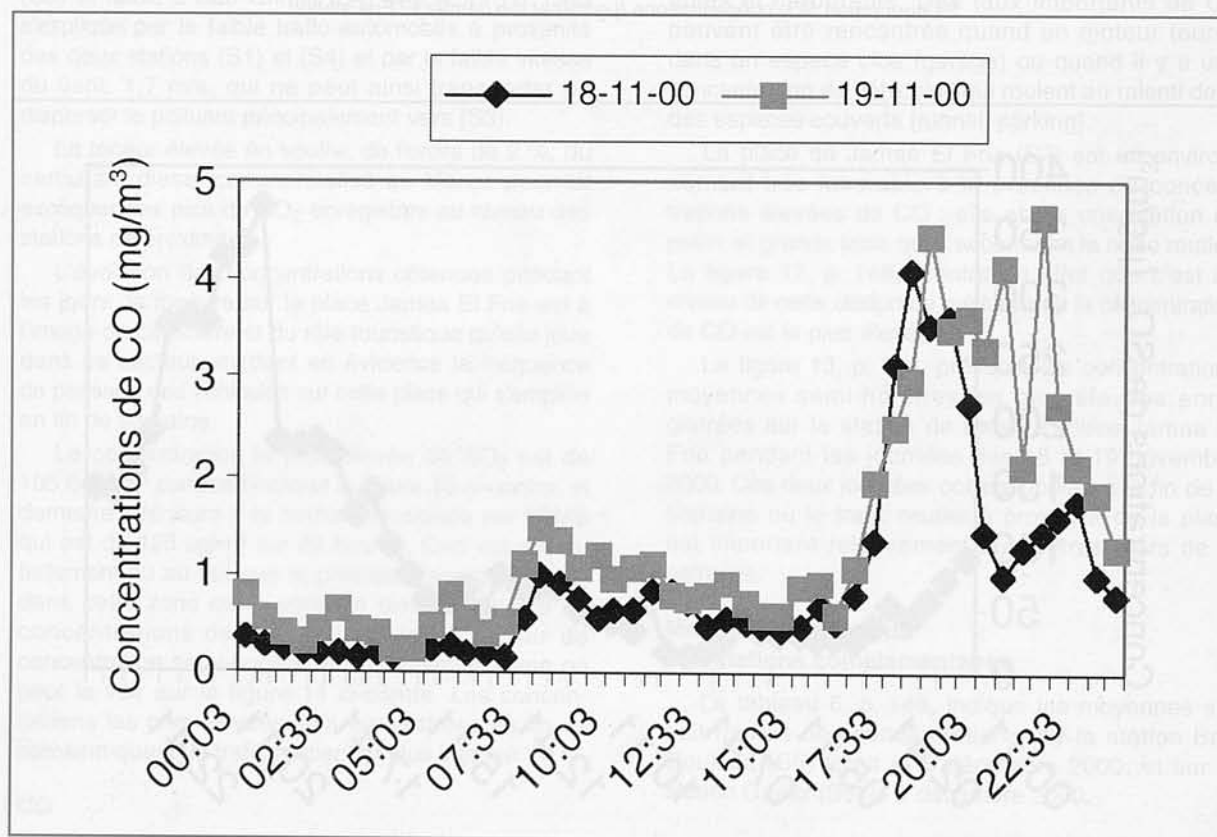


Figure 13.
Concentrations moyennes semi-horaires de CO, en mg/m³, sur la station Place Jamaa El Fna
pour les journées des 18 et 19 novembre 2000.
Half hourly CO concentrations (mg/m³) at the place Jamaa El Fna station, on November 18th and 19th, 2000.

Tableau 6.
Moyennes sur huit heures des concentrations
sur la station Bab Doukala (S5) les 4 et 5 décembre 2000,
et sur la station Guéliz le 6 décembre 2000.

Eight hours average concentrations
at the Bab Doukala station (S5) on December 4th and
5th, 2000, and at the Guéliz station on December 6th 2000.

Jours	SO ₂ µg/m ³	CO mg/m ³	O ₃ µg/m ³	NO _x µg/m ³
04-12-00	98,8	1,1	76,2	97,0
05-12-00	164,9	1,7	56,5	170,3
06-12-00	99,7	4,9	42,7	86,5

l'opinion publique à son application prochaine, cette campagne a pour objectif d'inciter les citoyens à effectuer, volontairement, des contrôles plus fréquents de l'état de leurs véhicules pour respecter les nouvelles normes.

Les voitures actuelles de tourisme émettent 90 % moins d'oxyde de carbone que celles non contrôlées des années 60. Néanmoins, vu le nombre important des véhicules en circulation et qui ne cesse de croître, le niveau de pollution s'étend de jour en jour.

On peut penser que le renouvellement du parc conduira à une réduction de la pollution.

Nous avons effectué des mesures concernant les émissions de polluants à l'échappement sur des véhicules circulant à Marrakech. Cette campagne a été menée avec la collaboration de la Sûreté régionale sur deux sites choisis pour leur trafic routier important.

Les normes marocaines [7] en valeurs limites d'émission des gaz d'échappement des véhicules figurent dans le tableau 7.

Tableau 7.
Normes marocaines [7] en valeurs limites d'émission
des gaz d'échappement des véhicules.

Moroccan standards [7] about limit
vehicle exhausts.

Véhicule essence		Véhicule diesel
HC	CO	Opacité de la fumée
700 ppm	4,5 %	70 %

Signalons qu'il n'existe pas de contrôles d'échappement des véhicules sur route ou dans les centres de visite technique.

Nous avons contrôlé 290 véhicules diesel et 246 véhicules essence parmi les voitures circulant dans la ville de Marrakech. Les véhicules testés sont censés représenter un échantillon des véhicules de tourisme et utilitaires en circulation dans la ville de Marrakech en matière de cylindrée, d'âge, d'état du moteur et du nombre de kilomètres effectués.

Tableau 8.
Répartition des véhicules diesel en fonction de leur opacité.
Apportionment of diesel vehicles according
to the exhaust gases opaqueness.

	Opacité < 70	Opacité > 70
% véhicules	66,2	33,8

Véhicules diesel

Ce pourcentage élevé de voitures ne respectant pas les normes pourrait être interprété par l'âge important, le type de véhicules ou le faible entretien de leur moteur. Leur répartition par type de véhicule figure dans le tableau 9.

Tableau 9.
Répartition par type de véhicule testé.
Apportionment according to the various tested vehicles.

Véhicule	Répartition (%)
Grand taxi	28,33
Petit taxi	25,00
Utilitaire	3,33
Léger	43,33

Tous les grands taxis sont des modèles compris entre 1976 et 1985.

Tableau 10.
Fréquence de révision du moteur.
Motor servicing frequency.

Date de la dernière révision (mois)	% de voitures
6	13,33
12	16,67
18	6,67
24-36	15,00
Moteur jamais révisé	48,33

Véhicules à essence

Les résultats de mesures des émanations de CO et d'hydrocarbures imbrûlés réalisées aux échappements des véhicules essence sont présentés dans le tableau 11, p. 150.

On met en évidence le fait que seuls 48,37 % des véhicules respectent les normes marocaines d'émission des gaz d'échappement aussi bien pour CO que pour HC. Ainsi, 14,64 % des véhicules dépassent la norme pour CO et 9,75 % dépassent la norme pour HC alors que 27,24 % des véhicules sont complètement hors normes.

Tableau 11.

Variation des émanations de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures totaux imbrûlés des échappements des véhicules essence.

Variation of carbon monoxide and total unburnt hydrocarbons emissions for petrol vehicles.

CO % HCppm	CO<4,5 HC<700	CO>4,5 HC>700	CO>4,5 HC<700	CO≤4,5 HC>700
%	48,37	27,24	14,64	9,75

Nous pouvons considérer que 51,63 % du parc des véhicules légers essence à Marrakech dépassent les normes et participent considérablement à la pollution atmosphérique. Ceci est principalement dû au manque d'entretien des moteurs de ces véhicules.

Lors de ces mesures des émanations des pots d'échappement des voitures, nous avons enregistré un taux de retour de 11 % pour un second contrôle après réparation des moteurs de véhicules diesel et essence. Lors du second contrôle, les valeurs obtenues pour les paramètres mesurés sont toutes dans les normes marocaines. Même si ce taux de retour est faible, nous considérons que cette opération a sensibilisé la population à la préservation de la qualité de l'air de la ville.

Marrakech ne possède pas de boulevard périphérique. Tous les véhicules en transit, quelle que soit leur destination, sont contraints de traverser la ville et participent ainsi à l'augmentation de la pollution atmosphérique.

Dans la vieille ville de Marrakech, intra-muros, vu l'étroitesse des rues, les véhicules circulent à vitesse réduite et émettent davantage de gaz polluants.

Les ronds-points qui ont les mêmes caractéristiques sont supposés avoir les mêmes taux ou des taux proches de polluants atmosphériques. Ces caractéristiques sont le nombre de véhicules traversant ces ronds-points, la circulation de l'air, le nombre de rues qui y aboutissent et le temps de séjour des véhicules.

Conclusion

On peut noter tout d'abord que les moyennes journalières des valeurs enregistrées dans toutes les stations pour les concentrations de l'ensemble des polluants sont en deçà des normes marocaines et des normes de l'OMS.

Le laboratoire mobile a été mis à notre disposition du 08-11-2000 au 06-12-2000. Pour des raisons d'agenda d'utilisation du laboratoire mobile, il nous a été impossible de programmer cette étude en période

de plus fort ensoleillement et de chaleur ambiante plus intense, en juillet par exemple, période de l'année pendant laquelle la température peut atteindre 48 °C à l'ombre avec un ensoleillement puissant provoquant des épisodes intenses de production d'ozone.

Il serait également intéressant d'élaborer un cadastre d'émissions de la région afin de lancer une étude par modélisation de la formation du smog sur la région de Marrakech.

Dans le but de réduire les émanations de gaz polluants de l'air, il serait très utile :

1. d'édifier une rocade sur l'axe routier Casablanca-Agadir. Ceci éviterait la traversée de la ville par tous les véhicules de transit ;
2. de déplacer le marché des fruits et légumes situé au centre de la ville (Bab Doukala, S5) en dehors de l'agglomération ;
3. d'interdire la circulation dans certaines rues de la ville ancienne (la médina) ;
4. d'installer un réseau permanent de mesure des polluants atmosphériques, des traces métalliques et des particules en suspension dans l'air, PM₁₀, eu égard au nombre important de véhicules diesel dans la ville et en vue d'établir une politique rigoureuse de prévention et de protection de la qualité de l'air à Marrakech ;
5. de mener une étude de l'impact de la qualité de l'air sur la santé de la population locale.

Remerciements

Nous remercions : Monsieur le Ministre et Président de l'Association le Grand Atlas, le Pr Mohamed Knidiri ; Monsieur le Ministre de l'Aménagement du Territoire, de l'Habitat, de l'Urbanisme et de l'Environnement, M. Mohamed El Yazghi ; Monsieur le Secrétaire Général du Département de l'Environnement, M. Bouhaoui.

Mots clés

Campagne de mesures. Marrakech. Pollution atmosphérique. Trafic routier.

Keywords

Monitoring. Marrakech. Air Pollution. Road traffic.

Références

1. Delannoy H. Aspects du climat de Marrakech et de sa région. Revue de Géographie du Maroc 1971 ; 20 : 69.
2. Emberger L. Une classification biogéographique des climats. Rec Trav Lab Bot Géol Zool. Université Montpellier, Série Bot 1954 ; 7 : 3-43.
3. Fiches mensuelles de la délégation du Ministère de l'Industrie, du Commerce, de l'Énergie et des Mines de la Wilaya de Marrakech, de janvier à décembre 2000.
4. Ministère du Transport et de la Marine Marchande rapport annuel, année 2000.
5. Norme ISO 6767-1990. Détermination de la concentration en masse de dioxyde de soufre – Méthode au tétrachloromercurate (TMC) et à la pararosanine, Organisation internationale de normalisation.
<http://www.iso.ch/iso/fr/CatalogueDetailPage.CatalogueDetail?CSNUMBER=13260>
6. Norme ISO 6768-1998. Détermination de la concentration en masse de dioxyde d'azote – Méthode de Griess-Saltzman modifiée, Organisation internationale de normalisation.
<http://www.iso.ch/iso/fr/CatalogueDetailPage.CatalogueDetail?CSNUMBER=13262>
7. Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et l'Environnement, rapport annuel, année 2000.
8. Valeurs guides OMS pour des polluants courants, aide-mémoire 1999 ; 187, WHO/OMS.
<http://www.who.int/inffs/fr/am187.html>

