

Samar C. Sakr¹

**LA POLLUTION PAR L'OZONE A BEYROUTH:
VARIABILITÉ DES CONCENTRATIONS
ENTRE LA ZONE URBAINE ET LA ZONE PÉRIPHÉRIQUE**

RÉSUMÉ

L'étude de la distribution des concentrations moyennes d'ozone au cours de la saison photochimique montre un rythme quotidien avec un minimum matinal, et un maximum entre midi et 16 h pour la station située en milieu urbain de trafic dense et la station périurbaine. A l'échelle hebdomadaire, la teneur en ozone est relativement élevée samedi et le dimanche (effet week-end) et baisse le vendredi à cause de l'intensification du trafic routier attestée par une hausse des concentrations en oxydes d'azote (NO_x). D'autre part pour la station située en zone périurbaine ayant un trafic moins dense les taux diurnes sont plus prononcée surtout dans l'après-midi et la période nocturne. L'analyse fréquentielle des concentrations maximales d'ozone montre, à l'échelle journalière, que la moitié de l'effectif total des dépassements s'effectue entre midi et 18 h. Les dépassements de la norme 180 µg/m³ sont enregistrés dans 90 % des cas avec un vent inférieur allant de 3 à 4 m/s. La rose de pollution confirme qu'il s'agit de situations de brise de mer le jour et de brise de terre la nuit.

MOTS-CLÉS: pollution atmosphérique, ozone, Beyrouth

Samar C. Sakr²

**OZONE POLLUTION IN BEIRUT:
VARIABILITY OF CONCENTRATIONS
BETWEEN THE URBAN ZONE AND THE PERIPHERAL ZONE**

ABSTRACT

The study of the distribution of the average ozone concentrations during the photochemical season shows a daily rhythm with a morning minimum, and a maximum between midday and 16:00 for the station located in urban environment of dense traffic and a station with a lower traffic. On a weekly scale, the content ozone is relatively high Saturday and Sunday (weekend effect) and lowers Friday because of the intensification of the road traffic attested by a rise of the nitrogen oxide concentrations (NO_x). In addition, for the station located in zone having a less dense traffic the diurnal rates are especially more marked during the afternoon and the night time. The frequently analysis of the maximum ozone concentrations shows, on the scale day, that half of the total staff complement of the goings beyond is carried out between midday and 18:00. The goings beyond standard 180 µg/m³ are recorded in 90 % of the case with a wind going from 3 to 4 m/s. The pink of pollution confirms that they are situations of breeze of sea the day and land breeze the night.

KEYWORDS: atmospheric pollution, ozone, Beirut

¹Université Libanaise, département de géographie, faculté des lettres et sciences humaines, Fanar, Liban,
e-mail: samarsakr2005@hotmail.com

²Lebanese University, department of geography, Faculty of Literatures and Human sciences, Fanar, Lebanon,
e-mail: samarsakr2005@hotmail.com

INTRODUCTION

Au cours des deux dernières décennies, la plupart des pays en voie de développement ont rejoint et souvent dépassé les nations anciennement industrialisées sur le plan de la pollution atmosphérique par suite de l'accroissement de la production industrielle et de la circulation des véhicules à moteur, en l'absence de toutes mesures destinées à limiter les émissions polluantes. Les taux d'O₃ et de NO₂ fréquemment élevés en période estivale (à cause de l'influence des rayons ultra-violet sur la photochimie des polluants) sont dangereux dans le cadre de leurs effets nocifs sur la santé de l'homme (irritation du système respiratoire, crise d'asthme, allergie). Suite aux effets constatés de ces polluants sur l'homme, il semble important d'étudier leur répartition spatiale et temporelle durant les épisodes de pollution. Les brises thermiques peuvent modifier les conditions de dispersion des polluants et peuvent par des phénomènes d'accumulation et de recirculation accentuer ou réduire les problèmes de pollution atmosphérique. Plusieurs chercheurs [Millan *et al.*, 1997; Kambezidis *et al.*, 1998; Cros, 1999; Clappier *et al.*, 2000; Cheng *et al.*, 2002; Liu, Chang, 2002] ont montré que les problèmes de forte pollution atmosphérique sont liés à des particularités météorologiques et géographiques de certaines régions.

Mais la répartition spatiale et temporelle de ces gaz durant les situations de brises reste encore inconnue à Beyrouth compte tenu de systèmes complexes de brises qui transportent les polluants, et de l'absence de mesures en continu sur une longue période. L'objectif de ce travail est de comprendre la variabilité spatiale de l'ozone dans la région d'étude et de comprendre sa relation avec les conditions météorologiques afin de mettre en évidence les situations propices aux fortes concentrations d'ozone.

RÉGION D'ÉTUDE

Le lieu retenu pour l'étude est la région de Beyrouth (33°52'48"N et 35°29'60"E), la capitale du Liban. C'est une région littorale située sur la rive Est de la mer méditerranéenne. Elle est caractérisée par une variété de paysages complexes et d'une occupation du sol contrastée, comportant une plaine assez étroite (de 8 à 4 km à vol d'oiseau de la mer au pied de la chaîne du Mont-Liban) se projetant dans la mer par la falaise de Ras Beyrouth et limitée à l'Ouest par un massif calcaire montagneux assez élevé incisé par des vallées encaissées. La région métropolitaine de Beyrouth représente un tissu urbain très dense et continu, se prolongeant vers les crêtes en évitant toutefois les vallées aux pentes les plus fortes (2 % du tissu urbain se développe sur les pentes supérieures à 60 %).

La zone d'étude dépasse la ville de Beyrouth pour s'étendre à la région métropolitaine de Beyrouth dont la population regroupe 33 % de la population libanaise. La région est caractérisée par un tissu urbain très dense, comportant des immeubles de taille plus élevés que le reste du pays (les constructions ont plus de 4 étages). Elle regroupe les activités économiques les plus importantes du pays. Elle constitue une zone de fortes émissions polluantes, surtout pour le trafic routier. La topographie favorise aussi d'importantes perturbations pour l'aérodynamique locale [Sakr, 2018 a]. Elle représente une zone à risque concernant la pollution atmosphérique (fig. 1).

DONNEES ET MÉTHODES DE RECHERCHE

Les données utilisées regroupent les données de l'ozone et les données météorologiques:

- Les données de la qualité de l'air: il s'agit des enregistrements horaires de l'ozone (O₃), recueillies d'un capteur Cairpatch implanté, au centre-ville, à proximité de l'axe périphérique de la région qui relie le Nord libanais au centre-ville. La période retenue s'étend sur 3 mois: juin juillet et août (2017 et 2018). Le deuxième capteur est implanté dans une zone périurbaine à l'abris des axes à forte circulation (fig. 1). L'échelle temporelle utilisée est à pas de temps horaire. Une étude statistique des nombres de dépassement des seuils de pollution par l'ozone a été ensuite adoptée permettant de mettre en évidence le comportement temporel des pics de pollution à échelle fine.

- Les données météorologiques utilisées regroupent la vitesse et la direction du vent de la station météorologique de l'aéroport international de Beyrouth implantée à 15 mètres d'altitude en bordure de la côte. Elle est située à 10 mètres du sol dans un lieu dégagé de tout obstacle. L'étude de la circulation des brises est basée sur l'utilisation des données enregistrées à un pas de temps horaire pour déterminer les modifications induites par l'arrivée des brises. Un anémomètre-girouette sans fil Vion C6500 enregistrable a été implanté à proximité du capteur Cairpatch à 10 mètres du sol afin de trouver des éléments de réponses expliquant les pics d'ozone et temps associés.

Les données d'ozone retenues sont relevées durant la saison photochimique, qui se déroule, selon la littérature, durant la période estivale: il s'agit de la saison photochimique: c'est l'intensité du rayonnement UV qui régit ces réactions chimiques. Nous avons retenu le seuil de recommandation et d'information horaire français ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$), au-delà duquel une exposition de courte durée représente un risque pour les personnes sensibles. Les heures mentionnées sont en temps local.

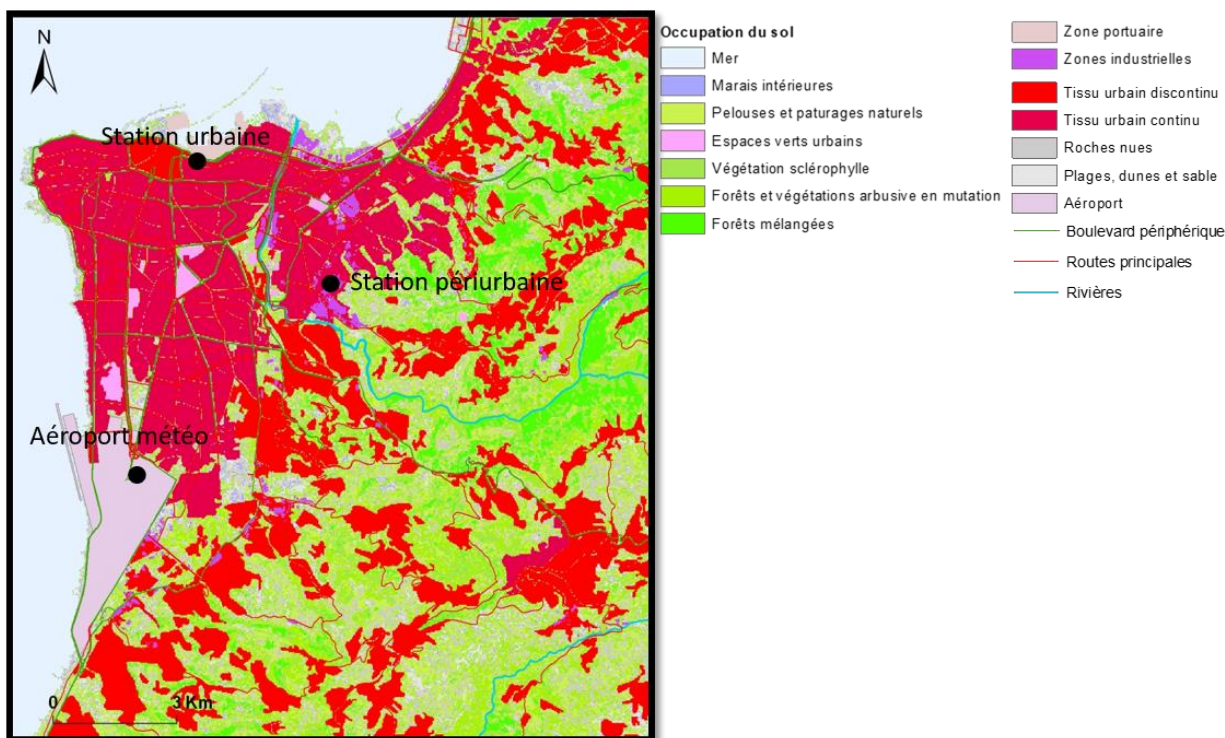


Fig. 1. La region d'étude regroupant les stations de mesures de l'ozone et la station météorologique

Fig. 1. Area of research of ozone stations and weather station

RÉSULTATS DE LA RECHERCHE ET DISCUSSION

Concentrations moyennes diurnes d'ozone pendant la période photochimique

Située près de la côte, à proximité d'un axe principal de circulation routier, la station urbaine subit l'influence des brises thermiques [Sakr, 2018 b] et anthropique (émission des polluants primaires). L'analyse des variations intra-journalières des concentrations moyennes d'ozone au cours de la saison photochimique montre un rythme quotidien en phase avec l'intensité du rayonnement solaire (fig. 2). En effet, après un minimum matinal à 7 h inférieur à $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, une hausse relativement forte des teneurs en ozone de $140 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a été observée jusqu'à 12 h

parallèlement à l'intensification des rayonnements ultraviolets. Cette croissance diminue à partir de 16 h 00 formant un palier de 12 h à 16 h avec un maximum de pollution par l'ozone. Durant cette période, l'intensité des deux processus de production et de destruction sont comparables [Martin, 2008]. Quant à la station périurbaine on remarque des taux plus accentués d'ozone pendant la journée. Dans la périphérie des agglomérations comme dans les centres-villes le poids du trafic automobile participe au renforcement de la production d'ozone au cours de la journée et à sa destruction au cours de la nuit. Les niveaux d'ozone sont plus élevés en milieu périurbain que dans les stations urbaines denses. Le dioxyde d'azote et l'ozone formés localement peuvent dépendre de plusieurs éléments, influencés par des perturbations liées aux activités humaines et au milieu. L'ozone formé au sol pourrait être également détruit par les mêmes polluants qui sont à l'origine de sa formation surtout par le monoxyde d'azote. En milieu urbain les concentrations d'ozone sont en général basses car leur destruction par les monoxydes d'azote émis par le trafic routier est importante. En zone périurbaine les concentrations d'ozone sont plus prononcées car les effets destructifs sont moins importants en raison d'un trafic routier moins dense, alors que les concentrations en dioxyde d'azote sont moins élevées qu'en zones urbaines.

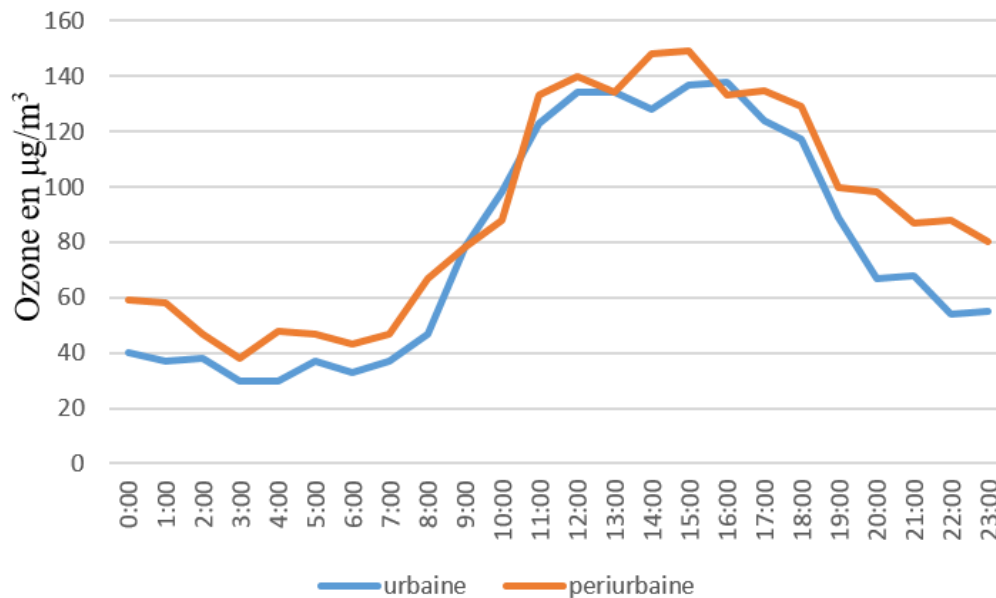


Fig. 2. Moyennes horaires des concentrations de l'ozone durant la période estivale 2017 et 2018
Fig. 2. Hourly mean ozone concentrations during the summer months of 2017 and 2018

A partir de 18 h, une baisse ponctuelle des taux d'ozone est constatée. Elle est due, vraisemblablement, à la destruction d'ozone sur place, parallèlement à une remontée des concentrations en NO_x/h associées à une forte circulation automobile: le processus de destruction d'ozone s'accélère. A 20 h, un palier s'amorce et se poursuit jusqu'à minuit suivi d'une nouvelle baisse, qui se termine le lendemain vers 7 h quand le cycle recommence. Comme il est produit à partir du rayonnement solaire l'ozone présente un cycle diurne. Le soir, en absence du soleil, sa production s'arrête et en raison de sa destruction par les monoxydes d'azote émis par le trafic routier, les concentrations de ce gaz diminuent. Par contre, le jour, au lever du soleil, l'ozone augmente en raison de la transformation photochimique des oxydes d'azote. De plus, en période d'inversion thermique, un afflux d'ozone plus ancien (1 journée ou plus) en altitude peut venir s'ajouter aux molécules formées le matin.

Régime hebdomadaire d’ozone: l’effet Week-end

A l’échelle hebdomadaire, des moyennes sur les 2 ans (fig. 3) montrent des concentrations relativement élevées samedi et le dimanche, de l’ordre de 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. L’effet “week-end” (WE) se réfère à des changements dans les concentrations d’ozone au niveau du sol résultant de la baisse du trafic routier en fin de semaine. Ce phénomène a été observé dans beaucoup d’autres atmosphères urbaines polluées. Cependant, nous avons enregistré les taux d’ozone les plus bas le vendredi, parallèlement à l’intensification du trafic, le flux qui se dirige vers les régions montagnardes pour passer les week-end.

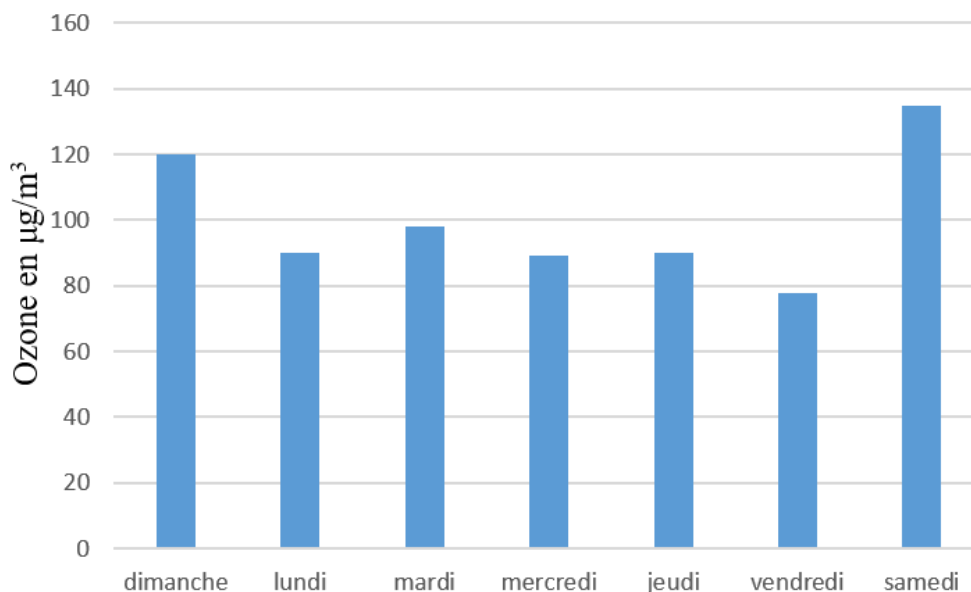


Fig. 3. Moyennes journalières des concentrations d’ozone de la station urbaine en juin, juillet et août de 2017 et 2018

Fig. 3. Average daily ozone concentrations at the urban station in June, July and August 2017 and 2018

Variations journalières des concentrations maximales d’ozone

Le seuil de 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a été dépassé durant 9 % des enregistrements horaires durant les années 2017, 2018 pour la station urbaine et 15 % pour la station périurbaine. 54 % de ces dépassements sont relevés entre midi et 19 h pour la station urbaine et 60 % pour la station périurbaine. Des concentrations élevées demeurent abondantes durant la nuit de 23 h à 3 h (fig. 4). La rose de pollution comprenant le nombre de dépassements du seuil de pollution par l’ozone en fonction des directions du vent montre que les enregistrements diurnes correspondent à des situations de brise de mer caractérisées par un vent modéré soufflant principalement des secteurs compris entre le sud-ouest et le nord-ouest (fig.5). En revanche, les dépassements nocturnes de seuils sont associés à des vents venant du sud-est au nord-est; il s’agit de la brise de terre.

Variations des concentrations en cycle de brise situation de 18 et 19 août 2017

Les brises de mer et de terre, et les brises de pente sont des circulations connues pour leur rôle dans le transport des polluants au-dessus des espaces urbains et industriels côtiers, nombreuses sont les études faites dans ce domaine [Romero, Ramis, 1996; Kambezidis et al., 1998; Liu, Chang, 2002; Cheng, 2002]. Les épisodes de dépassement enregistrés pendant la saison photochimique sont fortement corrélés aux situations de brise (alternance entre brise de mer et brise de terre)

associées à un temps radiatif avec ciel clair et vent faible à modéré, comme le montre l'exemple de l'épisode du 18 au 19 août 2017. Nous avons examiné simultanément la variation horaire des concentrations en ozone et la variation de la direction et de la vitesse du vent enregistré par la station de l'aéroport international de Beyrouth et à proximité de la station urbaine de mesure de l'ozone.

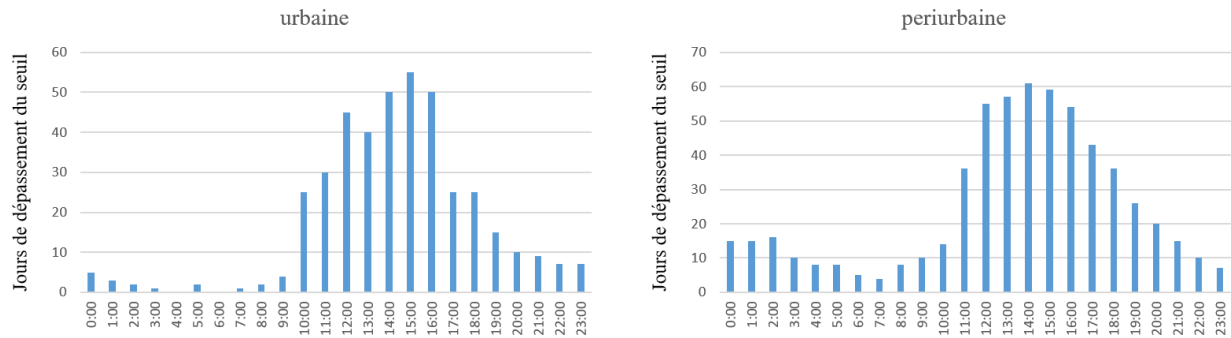


Fig. 4. Nombre de jours de dépassement du seuil 180 µg/m³ durant la saison photochimique pour les deux types de stations

Fig. 4. Number of days exceeding the 180 µg/m³ threshold during the photochemical season for both types of stations

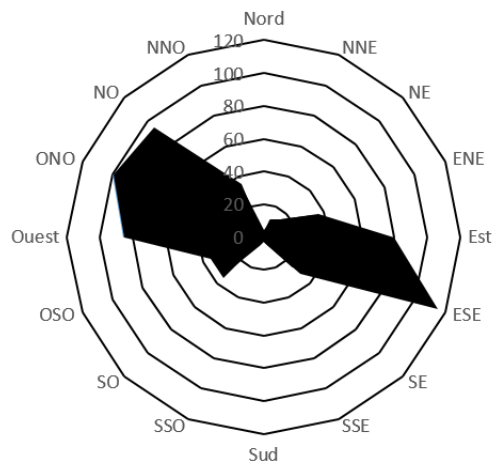


Fig. 5. Rose des vents corrélés avec le nombre de dépassement de l'ozone durant la période d'étude

Fig. 5. Wind rose correlated with the number of ozone exceedences during the study period

La situation synoptique en altitude durant ces 2 jours de brises se caractérisait par la présence d'un champ de haute pression dessinant une légère dorsale au-dessus du Moyen-Orient alors qu'en surface nous avons une situation de stabilité avec un champ de pression au-dessus du Liban de 1008 à 1010 hectopascals. La brise de mer est apparue le 18 août premier jour de cycle de brise vers 10 heures temps local aux stations de l'aéroport et celle située à proximité de la station urbaine (fig. 6) le changement de direction du vent est accompagné par une augmentation de sa vitesse.

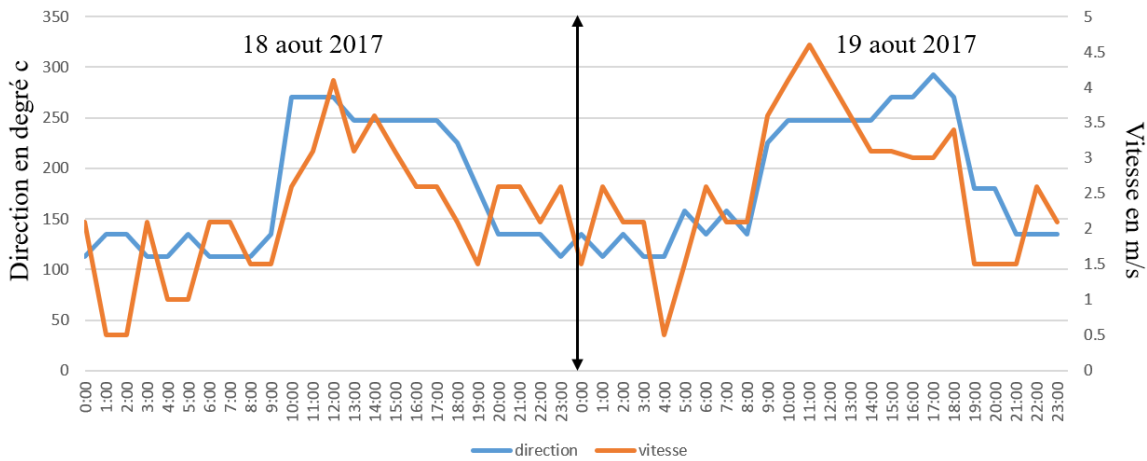


Fig. 6. Direction et vitesse du vent enregistrées lors d'un cycle de brise le 18 et 19 aout 1017
 Fig. 6. Wind direction and speed recorded during a breezy cycle on 18 and 19 August 1017

Dans la station urbaine et périurbaine, le pic d'ozone est relevé entre 12 h et 16 h quand la brise de mer est active (vitesse de 4 m/s). Toutefois, des concentrations élevées persistent après le coucher du soleil jusqu'à 3 h du matin surtout pour la station périurbaine en raison de la hauteur réduite de la couche limite par temps de brise la nuit et sous l'effet de la brise de terre (vent soufflant du sud-est) réacheminant les panaches d'ozone affrétés le jours par la brise de mer vers l'intérieur comme le montre la figure 6 et 7. En effet, cette dernière montre qu'une partie des concentrations supérieures à 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ est observée par vent de l'ouest (270°). Or, cette direction est observée en phase de brise de mer durant le jour les radiations solaires aident à la fabrication de l'ozone en présence des oxydes d'azote provenant du trafic routier intense en ville. L'absence de polluants primaires comme les oxydes d'azote (NO_x), la nuit, empêche la destruction de l'ozone [Martin, Carrega, 2007] surtout dans la station périurbaine qui enregistre la nuit des taux plus élevés que celle de la station urbaine.

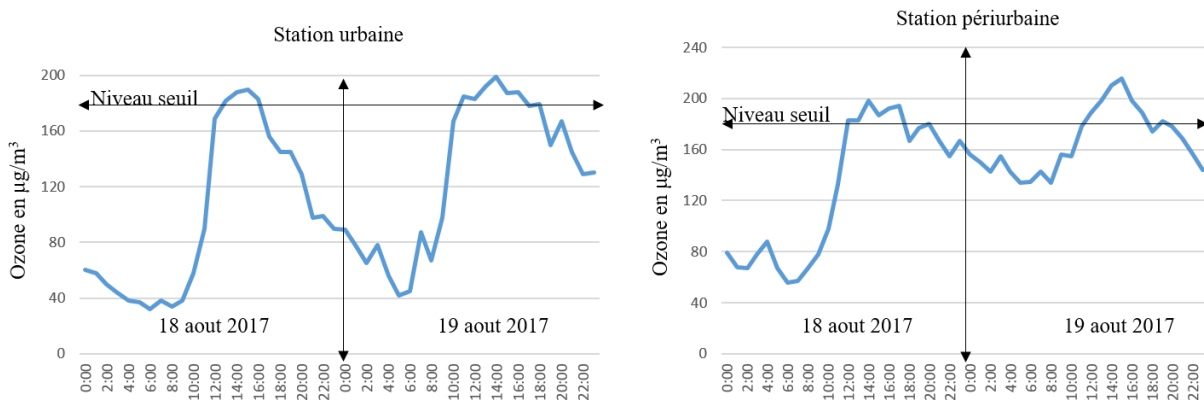


Fig. 7. Taux d'ozone enregistrés en temps de brise dans une station urbaine et périurbaine
 Fig. 7. Ozone levels recorded in breeze weather in an urban and peri-urban station

CONCLUSIONS

Dans notre présente étude nous avons pu mettre en évidence la fluctuation des taux d'ozone à partir de l'implantation de deux capteurs représentant deux types de stations différentes, une à proximité d'un trafic dense et l'autre dans une zone périurbaine ayant un trafic moins dense. Les

résultats obtenus montrent que la variabilité spatiale et temporelle de l’ozone a l’échelle journalière est habituelle avec un maximum de concentration allant de midi à l’après-midi à cause de la forte insolation, et un minimum en fin de nuit avec la forte stabilité atmosphérique. A l’échelle hebdomadaire, le régime des valeurs d’ozone paraît bien corrélé aux concentrations des oxydes d’azote. Cet aspect se dévoile principalement le week-end avec la dégradation du trafic automobile à proximité de la station, d’où l’augmentation de la pollution par l’ozone. De même, l’intensification du trafic routier le vendredi donne la situation inverse. L’analyse d’un cycle de brise avec une alternance de brises de mer et de terre montre que les concentrations d’ozone deviennent parfois critiques en dépassant le niveau seuil dans les deux types de stations.

BIBLIOGRAPHIE

1. *Cheng W. L.* Ozone distribution in coastal center Taiwan under sea-breeze conditions. *Atmospheric Environment*, 2002. V. 36. P. 3445–3459.
2. *Clappier A., Martilla A., Grossi P., Thunis P., Pasi F., Krueger B.C., Calpini B., Graziani G., Van Der Berch H.* Effect of sea breeze on air pollution in the greater Athens area: Part I Numerical simulation and field observations. *Journal of Applied Meteorology*, 2000. V. 39. P. 546–562.
3. *Cros B.* Expérience sur site pour contraindre les modèles de pollution atmosphérique et de transport d’émissions. Colloque Premiquil Predit. Toulouse, 1999. 29 novembre – 1 décembre.
4. *Kambizidis H.D., Weidauer D., Melas D., Ulbricht L.M.* Air quality in the Athens basin during sea breeze and non-sea breeze days using laser remote sensing technique. *Atmospheric Environment*, 1998. V. 32. P. 2173–2182.
5. *Liu H., Chang J.C.L.* An investigation of air pollutant patterns under sea–land breezes during a severe air-pollution episode in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 2002. V. 36. P. 591–601.
6. *Martin N., Carrega P.* Étude de la pollution par l’ozone à échelle fine, premières mesures itinérantes dans les Alpes-Maritimes. XXème colloque de l’Association Internationale de Climatologie. Tunis, 2007. P. 363–368.
7. *Martin N.* La pollution par l’ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen. Les Alpes Maritimes. Thèse de doctorat. Antipolis: Université de Nice-Sophia, 2008. 281 p.
8. *Millan M., Salvador R., Mantilla E., Kallos G.* Photo oxidants dynamics in the Mediterranean basin in summer: results from European research projects. *Journal of Geophysical Research*, 1997. V. 102. P. 8811–8823.
9. *Romero R., Ramis C.* A numerical study of the transport and diffusion of coastal pollutants during the breeze cycle in the island of Mallorca. *Annales Geophysicae*, 1996. V. 14. P. 351–363.
10. *Sakr S.C.* Analyse de l’aérologie locale dans la région de Beyrouth durant la période estivale. *Proceedings of the International conference InterCarto. InterGIS*, 2018. V. 24. Part 2. P. 281–291. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-281-291.
11. *Sakr S.C.* Brises thermiques et distribution du dioxyde d’azote dans la region de Beyrouth. *Geo-Sp*, 2018. V. 7. P. 23–30.

REFERENCES

1. *Cheng W. L.* Ozone distribution in coastal center Taiwan under sea-breeze conditions. *Atmospheric Environment*, 2002. V. 36. P. 3445–3459.
2. *Clappier A., Martilla A., Grossi P., Thunis P., Pasi F., Krueger B.C., Calpini B., Graziani G., Van Der Berch H.* Effect of sea breeze on air pollution in the greater Athens area: Part I Numerical simulation and field observations. *Journal of Applied Meteorology*, 2000. V. 39. P. 546–562.
3. *Cros B.* On-site experience to constrain models of air pollution and transport emissions. *Premiquil Symposium Predit*. Toulouse, 1999. November 29 – December 1 (in French).
4. *Kambizidis H.D., Weidauer D., Melas D., Ulbricht L.M.* Air quality in the Athens basin during sea breeze and non-sea breeze days using laser remote sensing technique. *Atmospheric Environment*, 1998. V. 32. P. 2173–2182.

5. *Liu H., Chang J.C.L.* An investigation of air pollutant patterns under sea–land breezes during a severe air-pollution episode in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 2002. V. 36. P. 591–601.
 6. *Martin N., Carrega P.* Study of fine-scale ozone pollution, first itinerant measures in the Alpes-Maritimes. XXth Symposium of the International Association of Climatology. Tunis, 2007. P. 363–368 (in French).
 7. *Martin N.* Ozone pollution and climatology in a Mediterranean area. The Maritime Alps. Doctoral thesis. Antipolis: University of Nice-Sophia, 2008. 281 p. (in French).
 8. *Millan M., Salvador R., Mantilla E., Kallos G.* Photo oxidants dynamics in the Mediterranean basin in summer: results from European research projects. *Journal of Geophysical Research*, 1997. V. 102. P. 8811–8823.
 9. *Romero R., Ramis C.* A numerical study of the transport and diffusion of coastal pollutants during the breeze cycle in the island of Mallorca. *Annales Geophysicae*, 1996. V. 14. P. 351–363.
 10. *Sakr S.C.* Analysis of local aerology in the region of Beirut during the summer period. Proceedings of the International conference InterCarto. InterGIS, 2018. V. 24. Part 2. P. 281–291. DOI: 10.24057/2414-9179-2018-2-24-281-291 (in French, abs English).
 11. *Sakr S.C.* Thermal breezes and distribution of nitrogen dioxide in the Beirut region. *Geo-Sp*, 2018. V. 7. P. 23–30 (in French).
-