

LA POLLUTION PAR L'OZONE À SFAX : VARIABILITÉ TEMPORELLE ET TEMPS ASSOCIÉS AUX FORTES CONCENTRATIONS

CHARFI S.¹ & DAHECH S.²

1 : Université de Sfax, unité de recherche GREVACHOT [charfisami_geo@yahoo.fr]

2 : Université de Sfax, Laboratoire SYFACTE [saalem.dahech@gmail.com]

Résumé – L'étude de la répartition temporelle des concentrations moyennes d'ozone au cours de la saison photochimique montre un rythme quotidien avec un minimum matinal à 7h inférieur à 30 ppb, et un maximum à 16h de 50 ppb. A l'échelle hebdomadaire, la teneur en ozone est relativement élevée samedi et le dimanche (effet week-end) et baisse le jeudi à cause de l'intensification du trafic routier attestée par une hausse des concentrations en oxydes d'azote (NO_x). 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 19h et que 33% sont relevés durant la nuit de 23h à 2h. Les dépassements de la norme 90 ppb sont enregistrés dans 90% des cas avec un vent inférieur 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, temps, Sfax.

Abstract – *Ozone pollution in Sfax: temporal variability and weather associated with high concentrations.* The study of the temporal distribution of ozone average concentrations during the photochemical season shows an in phase daily rhythm, with a morning minimum below 30 ppb at 7am and a maximum of 50 ppb at 4 pm. At a weekly basis, the ozone content is relatively high on Saturday and Sunday (the weekend effect) and low on Thursday because of increased road traffic, which brings about increased concentrations of nitrogen oxides (NO_x). At a daily basis, the frequency analysis of maximum ozone concentrations shows that half of the total number of excesses takes place between noon and 7 pm and 33% during the night, from 11 pm to 2 am. We have recorded excesses in the 90 ppb standards in 90% of cases with a wind below 4m / s. Pollution rose confirms the existence of sea breeze during the day and land breeze at night.

Keywords : Air pollution, ozone, weather, Sfax.

Introduction

L'ozone troposphérique, un gaz à effet de serre, pourrait avoir des effets nocifs sur la santé des Hommes ainsi que la végétation (Dab et Roussel, 2001). La pollution par l'ozone a suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs géographes-climatologues, physiciens, chimistes... Nous citons à titre d'exemple les travaux de Comrie et Yarnal (1992) en Pennsylvanie, de Kalabokas et al., (2000) à Athen, de Beaney et Gough (2002) à Toronto, de Berthelot (2006) à Tours et Orléans et de Martin (2008) à Nice. En Tunisie, la pollution atmosphérique par l'ozone est peu traitée, tout comme la qualité de l'air, en général. Le réseau de mesure de la qualité de l'air, géré par l'Agence Nationale de la Protection de l'Environnement (ANPE) depuis deux décennies, est peu dense et mal entretenu (Dahech, 2014). A Sfax, l'une des villes les plus polluées en Tunisie, on trouve seulement deux stations : la première en plein centre-ville et la deuxième à 5km plus au sud, au siège du groupe chimique.

L'objectif de ce travail est de cerner, dans un premier temps, la variabilité temporelle de l'ozone dans l'agglomération de Sfax suivant une approche multi-scalaire. Dans un deuxième temps, nous souhaitons comprendre sa relation avec les conditions météorologiques afin de mettre en évidence les situations propices aux fortes concentrations d'ozone.

1. Zone d'étude

Sfax est située au centre-est tunisien, au nord du Golfe de Gabès. L'agglomération (environ 600.000 habitants) prend la forme de demi-cercle ouvert sur la Méditerranée (fig. 1). Elle occupe une plaine de basse altitude à pente très faible, dirigée de l'ouest vers l'est. Cette topographie très basse et peu accidentée agit sur les températures de surface et la ventilation, elle favorise la pénétration de la brise de mer. La plupart des zones d'habitation se situent près de la côte et du centre-ville, là où sont observées les densités urbaines les plus élevées et les deux zones industrielles principales de la ville (la Poudrière au nord et El Maou au sud)

(Dahech, 2007). Le climat de Sfax est méditerranéen avec un été chaud et sec et un hiver doux et relativement arrosé. L'ensoleillement demeure élevé durant toute l'année, conditions météorologiques propices à de fortes concentrations d'ozone.

2. Données et Méthodes

2.1. Données de base

Les données utilisées sont de deux types :

- Les données de la qualité de l'air. Il s'agit des enregistrements horaires d'oxyde d'azote (NO_x) et d'ozone (O_3), recueillies de la station fixe de l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE). Elle est implantée, à 5km au sud du centre-ville, à proximité de la zone industrielle El Maou au siège du Groupe Chimique. La période retenue s'étend sur 5 ans (2006, 2007, 2009, 2010 et 2011). Les données sont parfois très lacunaires. Pour cette raison, certains axes de recherche n'ont pas pu être développés. La qualité des données a été vérifiée avant d'être exploitée. En effet, les données manquantes n'ont pas été remplacées mais leurs répartitions aux différentes échelles temporelles ont été vérifiées.

En outre, les erreurs aléatoires qui portent sur la cohérence entre les paramètres météorologiques, les données de pollution et la cohérence temporelle des données ont été examinées.

- Les données météorologiques de température, d'humidité, de la direction et de la vitesse du vent. Elles sont fournies par la station de Sfax-El-Maou installée à l'aérodrome et distante de 2 km de celle de l'ANPE. Nous n'avons pas utilisé les données météorologiques de la station de mesure des polluants de l'ANPE parce que l'anémomètre est installé à 2 m du sol dans une zone urbanisée.

2.2. Approche statistique

L'approche retenue est purement empirique. Elle est fondée sur plusieurs types d'analyses :

- Analyse descriptive des concentrations maximales d' O_3 à échelles temporelles emboîtées : horaire, quotidienne et hebdomadaire. L'échelle mensuelle n'a pas été retenue à cause des données lacunaires durant les mois de l'hiver. Une étude fréquentielle 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.
- Analyse bivariée des concentrations d' O_3 en fonction des paramètres météorologiques (surtout la vitesse et la direction des vents) afin de trouver des éléments de réponses expliquant les pics d'ozone et temps associés.

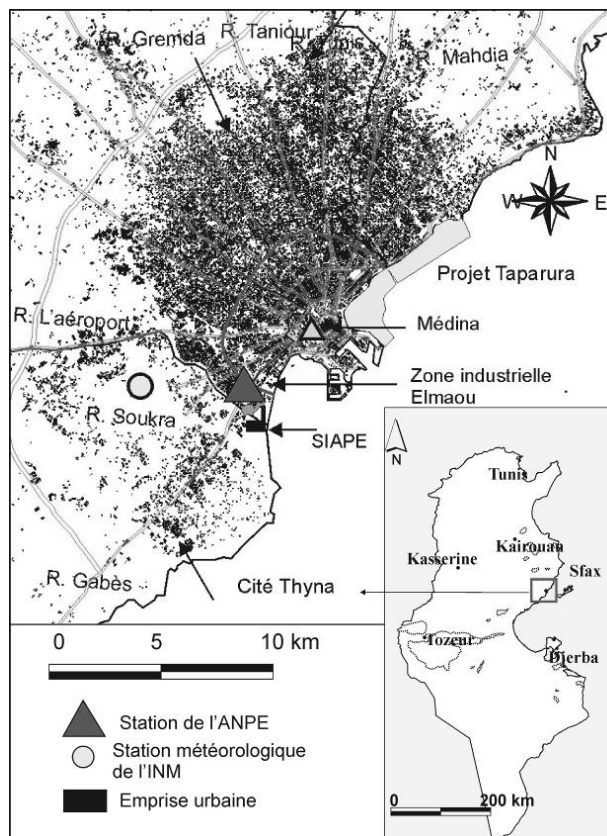


Figure 1. Localisation, emprise urbaine et sites des stations de mesure dans l'agglomération de Sfax

Les données d'ozone retenues sont relevées durant la saison photochimique, qui se déroule, selon la littérature, d'avril à septembre : il s'agit de la saison photochimique pour les latitudes tempérées de l'hémisphère nord : c'est l'intensité du rayonnement UV qui régit ces réactions chimiques. Au cours de cette période, les données lacunaires représentent environ le 1/3 des données. Nous avons retenu le seuil recommandé par le parlement européen (2008) de 90 ppb ($180 \mu\text{g}/\text{m}^3$), au-delà duquel une exposition de courte durée représente un risque pour les personnes sensibles (www.who.int). Les heures mentionnées sont en temps local (TU+1).

3. Résultats

3.1. Régime des concentrations moyennes d'ozone pendant la saison photochimique

3.1.1. Régime diurne d'ozone

Située près de la côte, à proximité d'un axe principal de circulation routier, la station du Groupe Chimique subit l'influence de plusieurs facteurs d'ordre naturel (brises) 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 7h inférieur à 30 ppb, une hausse relativement forte des teneurs en ozone (de 20 ppb) a été observée jusqu'à 12h parallèlement à l'intensification des rayonnements ultraviolets et probablement suite à la destruction de la couche d'inversion (Dahech, 2007). La croissance s'amenuise formant un palier de 13h à 17h avec un maximum de pollution par l'ozone de 50 ppb à 16h. Durant cette période, l'intensité des deux processus de production et de destruction sont comparables (Martin, 2008).

Entre 18h et 19h, 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 20h, un palier s'amorce et se poursuit jusqu'à minuit suivi d'une nouvelle baisse, qui se termine le lendemain vers 7h quand le cycle recommence. L'installation des couches d'inversion en fin de nuit tasse l'ozone au sol et il serait donc exposé au dépôt sec qui le détruit.

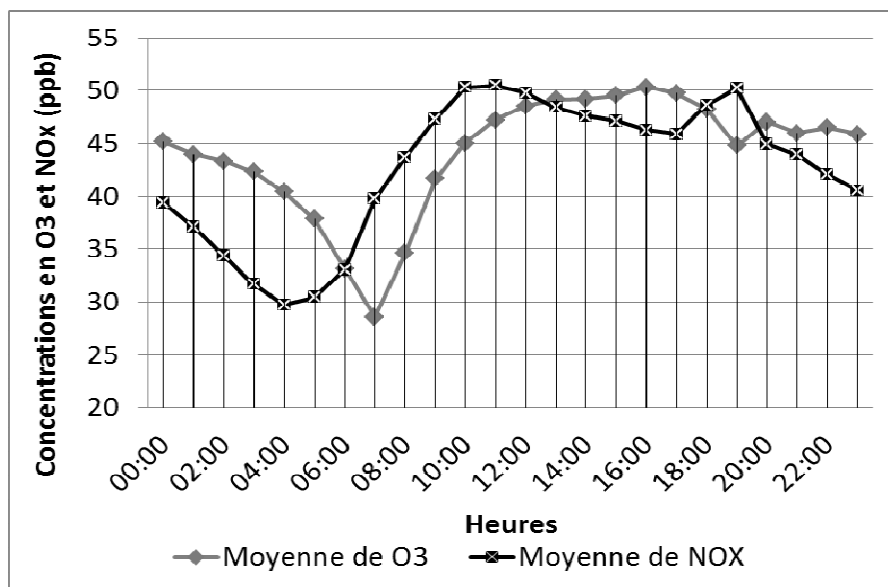


Figure 2. Moyennes horaires des concentrations d'ozone et d'oxyde d'azote à Sfax au cours des saisons photochimiques (années : 2006, 2007, 2009, 2010 et 2011).

3.1.2. Régime hebdomadaire d'ozone : l'effet Week-end

A l'échelle hebdomadaire, des moyennes sur les 6 ans montrent des concentrations relativement élevées samedi et le dimanche, de l'ordre de 50 ppb, conformément à la littérature (fig. 3). L'effet « week-end » (WE) se réfère à des changements dans les concentrations d'ozone au niveau du sol résultant de la baisse des émissions anthropiques en fin de semaine. Ce phénomène (WE) a été observé dans beaucoup d'autres atmosphères urbaines polluées (Rodrigo *et al.*, 2012). Cependant, nous avons enregistré les taux d'ozone les plus bas le jeudi, parallèlement à l'intensification du trafic, la veille du souk hebdomadaire (fig. 4).

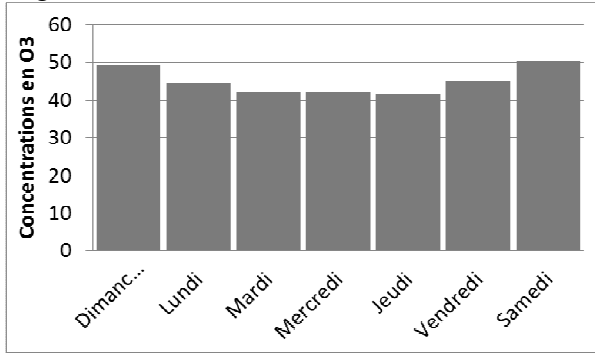


Figure 3. Moyennes journalières des concentrations d'ozone à Sfax au cours des saisons photochimiques de 2006, 2007, 2009, 2010 et 2011.

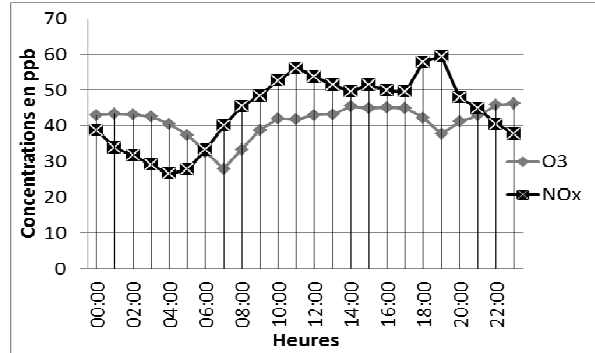


Figure 4. Moyennes horaires des concentrations d'ozone à Sfax les jeudis au cours des saisons photochimiques de 2006, 2007, 2009, 2010 et 2011.

Les concentrations des oxydes d'azote (NO_x) mesurées pendant cette journée confirment nos déductions. En effet, les pics des moyennes horaires de NO_x qui atteignent 60 ppb s'accompagnent par des baisses de la pollution par l'ozone. Cette décroissance est plus nette le jour, entre 10h et 12h et surtout en fin de l'après-midi (de 18h à 19h), lorsque l'activité d'approvisionnement du souk hebdomadaire atteint son paroxysme.

3.2. Variations des concentrations maximales d'ozone

3.2.1. Variations journalières et hebdomadaires des concentrations maximales d'ozone

Le seuil de 90 ppb a été dépassé durant 6% des enregistrements horaires durant les années 2006, 2007, 2009, 2010 et 2011. 54% de ces dépassements sont relevés entre midi et 19h. Des concentrations élevées demeurent abondantes durant la nuit de 23h à 2h (33% de l'effectif total) (fig. 5). Les valeurs d'ozone dépassant 90 ppb sont enregistrées dans 90% des cas quand le vent est faible à modéré : sa vitesse est inférieure à 4 m/s (fig. 6).

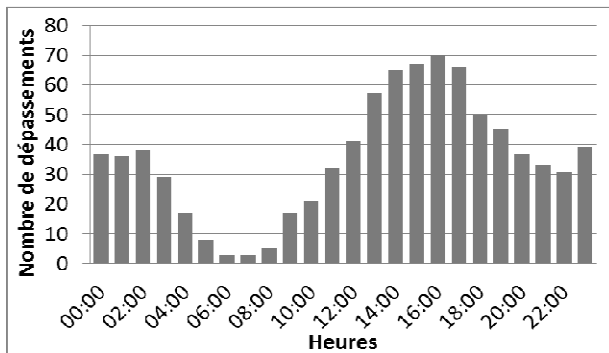


Figure 5. Variabilité horaire des dépassements des normes de concentrations d'ozone (90 ppb) à Sfax pendant les saisons photochimiques de 2006, 2007, 2009, 2010 et 2011.

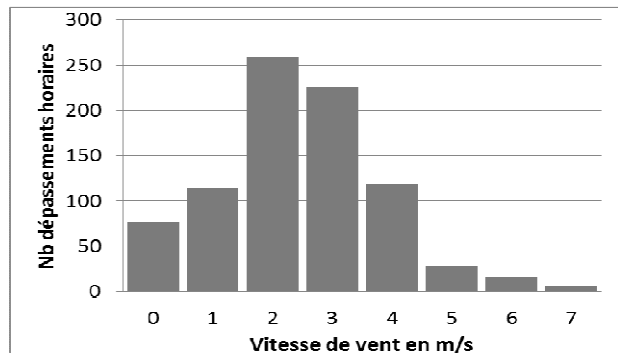


Figure 6. Variations du nombre des dépassements en fonction de la vitesse de vent (m/s) à Sfax pendant les saisons photochimiques de 2006, 2007, 2009, 2010 et 2011.

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 l'est-sud-est et le sud-sud-est (fig. 7). En revanche, les dépassements nocturnes de seuils sont associés à des vents venant du sud-sud-ouest (espace industrialisé et végétalisé tels que Sidi-Abid et Hajeb) ou du nord. Il s'agit de la brise de terre.

A l'échelle hebdomadaire, la figure 8 fait apparaître de faibles fréquences des nombres de dépassement horaires tout le long de la journée du jeudi pour les raisons précitées. En revanche, les courbes relatives aux autres jours de la semaine demeurent proches du profil journalier moyen.

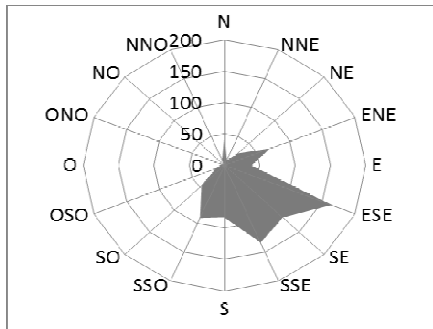


Figure 7. Nombre de dépassements par direction de vent à Sfax pendant les saisons photochimiques de 2006, 2007, 2009, 2010 et 2011.

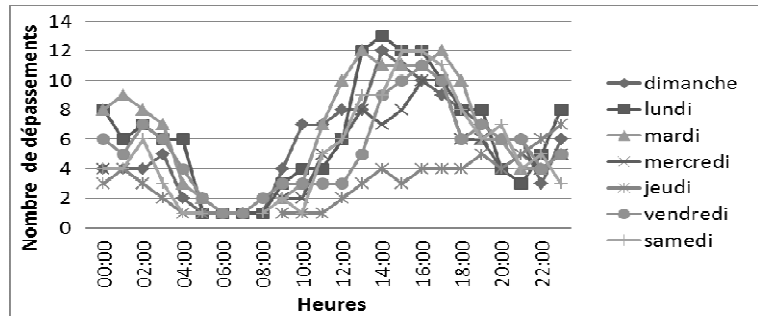


Figure 8. Variabilité horaire journalière du nombre de dépassements des normes de concentrations d'ozone (90ppb) à Sfax au cours des saisons photochimiques de 2006, 2007, 2009, 2010 et 2011.

3.2.2. Fortes concentrations par temps de brise

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 17 au 19 juin 2006. Nous avons examiné conjointement la variation horaire des concentrations en ozone (ANPE) et le vent (direction et vitesse) enregistré par la station de l'aérodrome de Sfax.

Durant cet épisode de pollution par l'ozone, environ 55% des observations horaires dépassaient le seuil de 90ppb (fig. 9A). L'atmosphère, plus stable au bord de la mer, par temps de brise, favorise ces fortes concentrations (Chang *et al.*, 2004 ; Martin, 2008).

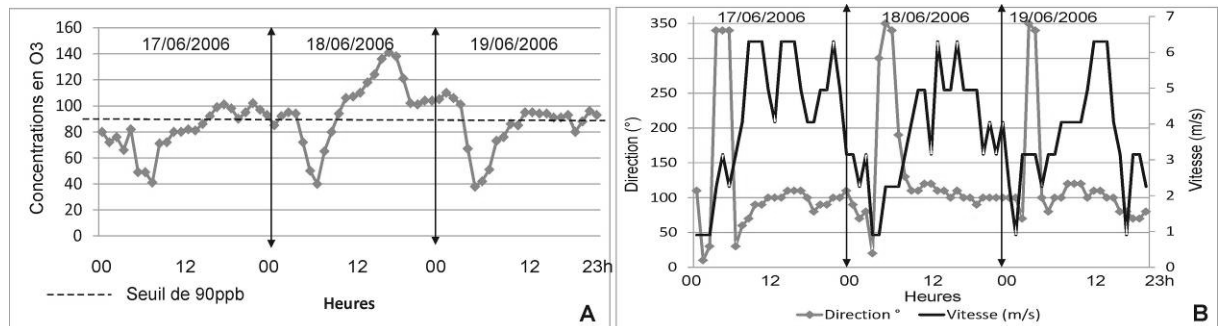


Figure 9. Concentrations en ozone (ppb) et vent (direction et vitesse) à Sfax du 17 au 19/06/2006.

Dans cette station littorale, le pic d'ozone est relevé entre 16h et 20h quand la brise de mer est encore active (vitesse supérieure à 3 m/s). Toutefois, les fortes concentrations persistent après le coucher du soleil jusqu'à 3h du matin en raison de la hauteur réduite de la couche limite par temps de brise la nuit (Dahech, 2007) et sous l'effet de la brise de terre (vent

soufflant du sud-ouest et du nord à Sfax) réacheminant les panaches d'ozone affrétés le jour par la brise de mer vers l'intérieur comme le montre les anémogrammes (fig. 9.B) et la rose de pollution (fig. 7). En effet, cette dernière montre qu'une partie des concentrations supérieures à 90ppb est observée par vent de nord (350°). Or, cette direction est observée en phase de brise de terre durant la nuit. Eventuellement, l'absence de polluants primaires comme les oxydes d'azote (NO_x), la nuit, empêche la destruction de l'ozone (Martin et Carrega, 2007).

Conclusion

Dans cette étude, nous avons pu, à travers les données issues de la station de surveillance de la qualité de l'air de l'ANPE au sud de l'agglomération de Sfax, mettre en évidence les fluctuations intra-journalières et hebdomadaires des concentrations d'ozone troposphérique et les facteurs qui les régissent. Globalement, pendant la saison photochimique, la variabilité temporelle de l'ozone à l'échelle journalière paraît classique avec un maximum de concentration l'après-midi à cause de la forte insolation et l'intensification de la turbulence atmosphérique, et un minimum en fin de nuit avec la forte stabilité atmosphérique (favorables aux inversions thermiques) et l'amincissement de la couche limite 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 jeudi donne la situation inverse. L'analyse du nombre de dépassement des seuils de pollution à l'échelle journalière montre que les concentrations d'ozone deviennent parfois critiques par temps de brise (alternance de brises de mer et de terre).

Bibliographie

- Beaney G., Gough W.A., 2002 : The influence of tropospheric ozone on the air temperature of the city of Toronto, Ontario, Canada. *Atmospheric Environment*, **36**, 2319-2325.
- Berthelot M., 2006 : Climat régional, climat local et pollution de l'air par l'ozone dans les agglomérations de Tours et d'Orléans, Thèse de doctorat, Université François Rabelais, 294 p.
- Chang W., Heikes B.G., Lee M., 2004 : Ozone deposition to the sea surface: chemical enhancement and wind speed dependence. *Atmospheric Environment*, **38**, 1053-1059.
- Comrie A.C., Yarnal B., 1992 : Relationship between synoptic scales, atmospheric circulation and ozone concentrations in metropolitan Pittsburgh, Pennsylvania. *Atmospheric Environment*, **26**, 301-312.
- Dab W., Roussel I., 2001 : *Air et la ville: les nouveaux visages de la pollution atmosphérique*, Paris : Hachette Littératures, 219 p.
- Dahech S., 2007 : *Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VII, 309 p + annexes.
- Dahech S., 2014 : Brise de mer et dégradation de la qualité de l'air dans les villes industrielles : cas de Tunis, Sfax et Gabès. 26p (sous presse).
- Kalabokas P.P.D., Viras L.G., Bartzis J.G., Repapis C.C., 2000 : Mediterranean rural ozone characteristics around the urban area of Athens. *Atmospheric Environment*, **34**, 5199-5208.
- Martin N., Carrega P., 2007 : Etude de la pollution par l'ozone à échelle fine, premières mesures itinérantes dans les Alpes-Maritimes, XX^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Tunis, pp. 363-368.
- Martin N., 2008 : La pollution par l'ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen : Les Alpes-Maritimes, Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 281p.
- Rodrigo J., Seguel A., Raúl G.E., Morales S.B., Manuel A., Leiva G.B., 2012: Ozone weekend effect in Santiago, Chile. *Environmental Pollution*, **162**, 72-79.