

Distribution spatiale des O₃, NO_x et SO₂ et évaluation des interactions troposphériques sur la ville de Tunis (Tunisie)

Spacial distribution of O₃, NO_x and SO₂ and evaluation of tropospheric interactions in Tunis (Tunisia)

Hassen Kchih¹, Semia Cherif²

Résumé

Cette étude évalue la pollution urbaine en O₃, NO_x et SO₂ et les interactions locales avec les paramètres météorologiques de la capitale Tunis (Tunisie) entre 2003 et 2014. Elle permet d'établir des cartes de la distribution de la pollution gazeuse puis, par une approche statistique d'étude de la corrélation et d'Analyse en Composantes Principales (ACP), d'établir les interactions existant entre les paramètres météorologiques et les concentrations en ozone et oxydes d'azote. Des concentrations élevées en ozone sont observées sur la zone d'étude (66-130 ppbv), et leur distribution opposée à celle des concentrations en oxydes d'azote et dioxyde de soufre, même si les valeurs de ces derniers ne dépassent pas les normes (respectivement 51-178 ppbv et 1,8-4,4 ppbv). La matrice de corrélation ainsi que l'ACP ont permis de constater une forte corrélation entre l'ozone, la température et l'intensité des radiations solaire, d'une part, et l'humidité relative de l'air et la concentration en monoxyde d'azote, d'autre part, ces deux groupes étant anti-corrélés. Les concentrations en dioxyde d'azote apparaissent ici indépendantes des phénomènes photochimiques et très peu corrélées aux autres paramètres.

Mots-clés

pollution urbaine, ozone, oxyde d'azote, dioxyde de soufre, acp.

Abstract

Assessment of urban pollution by O₃, NO_x and SO₂ and local interactions with weather parameters is conducted in the capital Tunis (Tunisia) between 2003 and 2014. It established the distribution maps of the gaseous pollution and highlights the interactions between ozone and nitrogen oxide concentrations as well as meteorological parameters by a statistical approach using correlation studies and principal component analysis (PCA). Quite high ozone concentrations are reported in the study area (66- 130 ppbv) and their distribution is the opposite of nitrogen oxides and sulphur dioxide's (respectively 51-178 ppbv et 1,8-4,4 ppbv). The correlation matrix and the PCA show a high correlation between ozone, temperature and the intensity of solar radiations on one side, and relative air humidity and nitrogen monoxide on the other side. These two groups are anti-correlated. Nitrogen dioxide concentrations seem to be independent of the photochemistry with a limited correlation to the other parameters.

Keywords

urban pollution, ozone, nitrogen oxides, sulphur dioxide, pca.

(1) Agence Nationale de la Protection de l'Environnement, Centre Urbain Nord, Belvédère, Tunisie.

(2) UR Chimie des Matériaux et de l'Environnement UR11ES25, ISSBAT, université de Tunis El Manar, Tunisie.

1. Introduction

La dégradation de la qualité de l'air et son impact sur la santé et l'environnement sont devenus une préoccupation primordiale au vu de leurs aggravations. Ce sont les grandes agglomérations qui sont le plus touchées par la pollution automobile et les rejets dans l'atmosphère des unités industrielles et énergétiques. Parmi les polluants atmosphériques produits par ces sources de pollution, il est possible de distinguer les particules en suspension, les oxydes d'azote (NO_x) comprenant le NO et le NO_2 , le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), les nitrates et sulfates aérosols et les métaux lourds. Ils ont des impacts sur tous les milieux, et même sur les produits de consommation courante.

Le dioxyde de soufre provient principalement de la combustion des combustibles fossiles tels que le charbon ou le fioul (Joly et Peuch, 2012). Les impuretés soufrées contenues dans les combustibles sont alors oxydées par le dioxygène de l'air O_2 en dioxyde de soufre SO_2 .

Ce polluant gazeux est rejeté par les installations de chauffage domestique et les véhicules mais surtout par les centrales de production énergétique. Certains procédés industriels produisent également des rejets soufrés, par exemple par raffinage de pétrole, métallurgie ou production d'acide sulfurique. Les éruptions volcaniques représentent la part non anthropogénique des rejets atmosphériques de dioxyde de soufre.

Les oxydes d'azote NO_x proviennent, de même que pour le SO_2 , de la combustion des combustibles fossiles (Mittal *et al.*, 2007 ; Minoura et Ito, 2009 ; Che *et al.*, 2011) et de certains procédés industriels comme la production d'acide nitrique, la fabrication d'engrais ou les traitements de surfaces. Le NO_2 est très toxique, et les pics de concentrations sont plus nocifs que la même dose étalée sur une longue période. Le NO est un gaz irritant pour les bronches, et réducteur du pouvoir oxygénateur du sang. Les oxydes d'azote sont une source d'acidification des pluies par leur transformation en acide nitrique. Ce sont également des précurseurs d'ozone, également néfastes pour l'environnement et la santé (Zhang *et al.*, 2011).

L'ozone (O_3) est un constituant minoritaire de l'atmosphère présent dans la troposphère à de faibles concentrations de l'ordre du ppbv. Il n'est pas directement issu des activités humaines, c'est un polluant secondaire dont la production photochimique nécessite l'intervention de gaz émis naturellement ou par les combustions, dits précurseurs, tels que le

monoxyde de carbone, les oxydes d'azote, le méthane ou les hydrocarbures (Saunois, 2009).

Si la qualité de l'air dépend de l'émission de substances polluantes par différentes sources telles que les sites industriels, les transports, l'agriculture ou le chauffage, elle dépend aussi des conditions météorologiques et topographiques. Celles-ci vont influencer le transport, la transformation et la dispersion des polluants (Boucouvala et Bornstein, 2003 ; Lin *et al.*, 2007). La température agit sur la volatilité des gaz mais également sur les réactions photochimiques atmosphériques, dont la production d'ozone. L'insolation intervient également dans la formation d'ozone. C'est donc essentiellement en été que le problème des fortes concentrations d'ozone peut se poser.

La formation d'ozone, à partir de polluants primaires, nécessite un certain temps durant lequel les vents dominants déplacent les masses d'air des zones fortement polluées du centre-ville ou des sites industriels (Sillman, 1999 ; Barret *et al.*, 2008 ; Fernández-Fernández *et al.*, 2011) vers la périphérie, en direction des zones dortoir ou rurales (Luo *et al.*, 2000 ; Ghazali *et al.*, 2010 ; Fernández-Fernández *et al.*, 2011). Durant ce déplacement, le monoxyde d'azote (NO), qualifié de « puits d'ozone », va limiter la concentration d'ozone en le consommant. Les concentrations d'ozone dépendront alors également du rapport entre les concentrations de NO_2 et de celles de NO (Cive-rola *et al.*, 2007 ; Azmi *et al.*, 2010).

Cette étude évalue la pollution urbaine et les interactions locales en O_3 , NO_x et SO_2 de la capitale Tunis (Tunisie). Une cartographie de la distribution des polluants est d'abord représentée, puis l'analyse des interactions entre l'ozone, le monoxyde d'azote (NO), le dioxyde d'azote (NO_2) et les différents paramètres météorologiques de température, d'humidité relative atmosphérique et de radiations solaires est effectuée en utilisant une approche statistique par analyse en composantes principales (ACP).

2. Zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la métropole de Tunis, capitale de la Tunisie. Sa superficie est de 300 000 hectares, avec une population de 2,5 millions d'individus. Cette zone contribue à hauteur de 30 % à la pollution totale du pays (figure 1).

Les polluants gazeux majeurs, à savoir l'ozone (O_3), les oxydes d'azote (NO_x) et le dioxyde de soufre (SO_2) ont été échantillonnés sur quatorze sites (figure 2), répartis sur toute la zone d'étude.

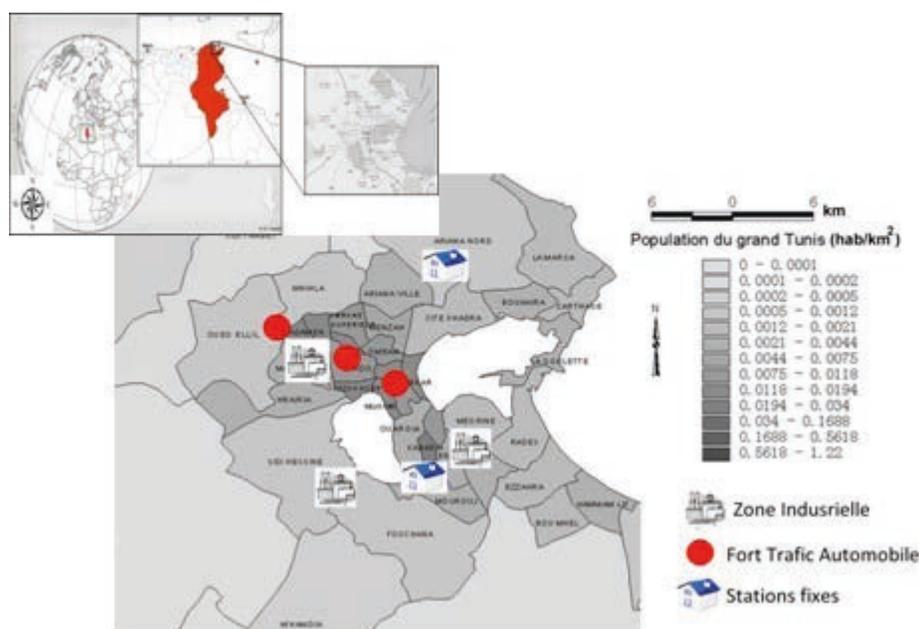


Figure 1. Zone d'étude : le Grand Tunis.

Study area: Greater Tunis.

Ces sites ont été choisis en fonction de certaines de leurs caractéristiques spécifiques, à savoir la densité de la population, la proximité d'une importante zone industrielle, l'intensité du trafic routier et les conditions météorologiques locales de vent dominant, de température, d'humidité relative et d'ensoleillement (figure 1).

3. Échantillonnage, mesures, analyses et calculs

Deux types d'échantillonnages des polluants gazeux ont eu lieu, l'un grâce à une station mobile, l'autre grâce à des stations fixes. Dans les deux cas et parallèlement au suivi de la qualité de l'air, les paramètres météorologiques de vitesse et de direction du vent, de la température et de l'humidité relative de l'air ont également été suivis.

Les échantillonnages sont réalisés à partir d'une station mobile (itinérante) de suivi de la qualité de l'air sur chacun des quatorze sites (figure 2) choisis durant une semaine (parfois deux), tout au long de l'année 2003 puis de l'année 2014. Les concentrations en ozone (O₃), oxydes d'azote (NO_x) et en dioxyde de soufre (SO₂) étaient analysées toutes les 3 minutes puis converties en données horaires, et ceci durant toute une semaine, ce qui a permis d'obtenir environ 700 données par campagne et par site, voire davantage quand le suivi a duré plus longtemps.

La station fixe d'El Mourouj a été choisie pour l'analyse multivariée des interactions des polluants gazeux et des paramètres atmosphériques à cause des fréquents dépassements des normes observées dans cette zone pour l'ozone. Les protocoles d'échantillonnage et les périodes d'études sont les mêmes que pour les stations mobiles.

Les résultats qui sont sous forme de variations nyctémérales sont établis pour des moyennes annuelles pour une heure donnée, et ceci sur 24h ; ils concernent les échantillonnages durant toute l'année 2014.

Les instruments utilisés pour la collecte et l'analyse des polluants sont tous de la marque Environment S.A. France : pour l'ozone, le O₃ 41M, Photometric ambient ozone Analyzer ; pour les oxydes d'azote, AC31M, Chemiluminescence NO-NO₂-NO_x Analyzer ; pour le dioxyde de soufre, le AF21M, Fluorescent SO₂ Analyzer. Les instruments sont calibrés selon les protocoles de l'Agence Nationale de la Protection de l'Environnement (Tunisie). Il y a un contrôle journalier nocturne automatique de calibration, et un contrôle préventif et de maintenance hebdomadaire par un opérateur. Un contrôleur indépendant s'occupe de la calibration de tout le système tous les six mois environ.

Les données collectées par les stations fixes sont transmises à distance toutes les heures. Elles sont vérifiées automatiquement et manuellement. Le logiciel XR-WKS version 6.0 Iséo collecte, gère, valide, signale et archive les données relatives

aux informations transmises, leur validation et leur diagnostic. Ces systèmes et données sont issus du Réseau National de Surveillance de la Qualité de l'Air (RNSQA) relevant de l'Agence Nationale de la Protection de l'Environnement (ANPE) de Tunisie.

Dans cette étude, les logiciels utilisés sont l'environnement logiciel gratuit R de calcul et graphisme statistique pour élaborer la matrice de corrélation et l'Analyse en Composantes Principales (ACP), et le logiciel ArcGIS version 10.2 pour élaborer les cartes de distribution des polluants O_3 , NO_x et SO_2 sur le Grand Tunis. La méthode utilisée par ce logiciel est la méthode d'analyse géostatistique. L'outil de densification du réseau d'échantillonnage est basé sur le krigeage ordinaire, le mode d'interpolation étant le lissage par noyaux avec barrière. Cette méthode d'interpolation permet l'obtention d'une répartition des polluants des plus proches de la réalité et facilite l'interprétation des cartes obtenues.

4. Résultats et discussion

4.1. Cartographie de la pollution gazeuse

En vue d'avoir un état des lieux concernant la pollution troposphérique gazeuse pour pouvoir, par la suite, étudier les origines et interactions possibles, une cartographie de la qualité de l'air des trois polluants atmosphériques gazeux majeurs est effectuée. Il s'agit de l'ozone O_3 , les oxydes d'azote NO_x et le dioxyde de soufre SO_2 qui sont étudiés pour leurs maxima horaires sur le Grand Tunis. Celui-ci comprend quatre gouvernorats (Tunis, l'Ariana, Man-nouba et Ben Arous) d'environ 2,5 millions d'habitants.

La carte de distribution de l'ozone troposphérique (figure 2) indique clairement deux zones, dans la gamme la plus élevée de concentrations et de couleur rouge sur la figure, entre 66 et 130 ppbv, qui sont les plus touchées par le polluant ozone. Elles se situent au nord-est et au sud-est du Grand Tunis, dans deux zones périurbaines éloignées d'environ 20 km du centre-ville. Ces concentrations en ozone se situent à la limite des 120 ppbv des normes et directives (Norme Tunisienne NT106.04 de 1994, Guide de lecture des directives européennes 2008/50/CE et 2004/107/CE, 2009, Décret n° 2010-1250, octobre 2010). Les zones les moins touchées par la pollution en ozone couvrent essentiellement la moitié ouest de la zone d'étude, de couleur jaune-vert sur la figure 2, où les concentrations varient entre 30 et 38 ppbv. Les minima sont atteints dans la région est du Grand Tunis, avec des valeurs oscillant entre 10 et 30 ppbv et figurés en bleu, en bordure de mer et au centre-ville.

Topographiquement, le site de la ville de Tunis est complexe : topographie ondulée de petites collines dans la ville, amphithéâtre de hautes collines et de petits Jbel aux alentours, lac (de Tunis) et sebkhas (Ariana et Es-Sijoumi), position littorale au creux d'un golfe. Les éléments naturels d'un paysage de ce genre, combinés à la présence d'une nébuleuse urbaine, peuvent provoquer un enchevêtrement d'interactions topothermiques indépendantes de la circulation d'échelle synoptique. La rose des vents au sol montre une nette domination des directions du secteur SE favorable aux influences maritimes. Ces flux, de composantes est, représentent l'aspect d'une circulation azonale liée à des effets locaux. Au niveau 1 000 hPa, une déviation nette vers le secteur sud est amorcée. Au niveau 925 hPa, des flux de composantes sud et ouest dominant. Ces flux sont compatibles avec la circulation synoptique zonale d'ouest de la zone tempérée méditerranéenne (El Melki, 2007). La zone d'étude est entourée à l'ouest, au nord et au sud-est de la zone d'étude par des Jbel, qui sont des collines et montagnes. Les régions à fortes et faibles concentrations en ozone pourraient donc être définies par une conjonction de ces caractéristiques régionales, à savoir les Jbel, les vents dominants du nord-ouest et la circulation azonale dans le golfe de Tunis, au centre-est de la zone d'étude, due à la présence de la Méditerranée.

Les cartes de distribution de la pollution en oxydes d'azote (figure 3) et en dioxyde de soufre (figure 4) sont très similaires et opposées à celle de la pollution en ozone (figure 2) : les zones de fortes concentrations en ozone correspondent globalement aux zones de faibles concentrations en oxydes d'azote et dioxyde de soufre, et inversement.

Les oxydes d'azote sont présents sur toute la zone d'étude, entre 51 et 178 ppbv. Ils sont majoritairement concentrés au centre et à l'ouest du Grand Tunis (couleur bleu foncée sur la figure 2), avec des valeurs qui oscillent entre 80 et 178 ppbv. Ceci correspond également aux zones de concentrations maximales en dioxyde de soufre, où elles oscillent entre 1,8 et 4,4 ppbv (figure 4). Toutes ces concentrations se situent en deçà des valeurs guides relatives au bien-être des normes et directives (tunisiennes, françaises et européennes).

Ainsi, il peut être observé que, globalement, les oxydes d'azote et le dioxyde de soufre présentent des concentrations élevées, représentées par les deux couleurs rouge et orange sur les cartes (figures 3 et 4), à proximité des sources d'émissions de ces polluants, à savoir les industries et une circulation automobile élevée (figure 1). Ces polluants, dits primaires, sont directement issus des sources de pollution, qu'elles soient d'origine industrielle ou automobile, leurs

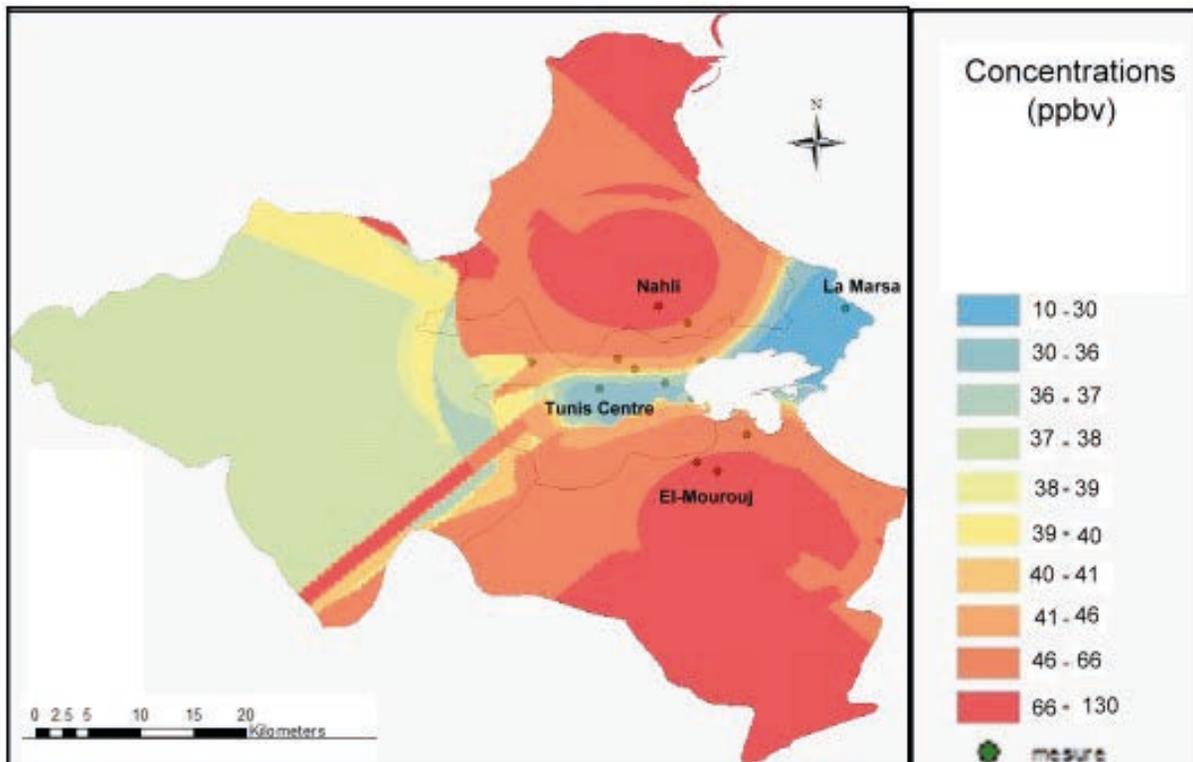


Figure 2. La carte de distribution de l'ozone (O_3) sur le Grand Tunis en concentrations maximales horaires (ppbv).
Distribution map of ozone O_3 on Great Tunis in highest hourly concentrations (ppbv).

concentrations sont donc naturellement plus élevées à proximité de leur source. Leurs concentrations les plus basses, correspondant aux concentrations les plus élevées en ozone, sont mesurées à distance des sources de pollution. En effet, dans la zone d'étude enclavée par les reliefs, les vitesses des vents de surface sont faibles. Il s'agit davantage de brises thermiques que réellement de vents d'échelle synoptique (El Melki, 2007). Le gradient thermique, durant la période estivale coïncidant avec la majorité des épisodes d'ozone, est dirigé de l'ouest vers l'est du Grand Tunis (Charfi et Dahech, 2013) et pourrait expliquer la majorité de cette répartition.

L'ozone, par contre, est un polluant secondaire issu de la réaction entre les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et les composés organiques volatils, sous l'action des rayonnements solaires. L'ozone est détruit par le monoxyde d'azote (NO). Ce dernier agit comme un puits d'ozone puisqu'il le consomme. Si le nuage de polluants formé sur la ville se déplace à la campagne ou en zone périurbaine où les émissions de NO sont moindres, les concentrations en ozone vont augmenter puisque l'ozone n'est plus consommé. La formation de polluants secondaires nécessite un certain temps durant lequel les masses d'air se déplacent. Ce qui explique pourquoi les pointes de polluants secondaires concernent des territoires souvent plus étendus que les pointes de

polluants primaires. La couronne rurale des régions périurbaines, représentées par la couleur rouge dans la figure 2 (banlieue nord et sud), autour de la région tunisoise, est fortement concentrée en ozone. Celui-ci s'est formé après le transport des précurseurs d'ozone par les masses d'air en direction de la zone périurbaine et leurs transformations photochimiques.

Sous l'action des rayonnements ultraviolets solaires et d'une température élevée, les polluants primaires peuvent donner naissance, dans la basse atmosphère, à des polluants secondaires tels que l'ozone. Ces composés constituent le smog photochimique, à l'origine du nuage brunâtre qui stagne parfois au-dessus des grandes villes comme Tunis. En vue de cerner ce phénomène au niveau local, les interactions des polluants avec les paramètres atmosphériques sont étudiées par une analyse multivariée.

4.2. Analyse multivariée des interactions des polluants gazeux et des paramètres atmosphériques

Au niveau de la troposphère, la production excessive d'ozone dans les grands centres urbains est à l'origine d'une pollution lors de conditions météorologiques particulières. L'ozone absorbe les radiations dans le domaine des infrarouges lointains (entre 4 et 40 μm), ce qui confère à l'ozone troposphérique un rôle dans

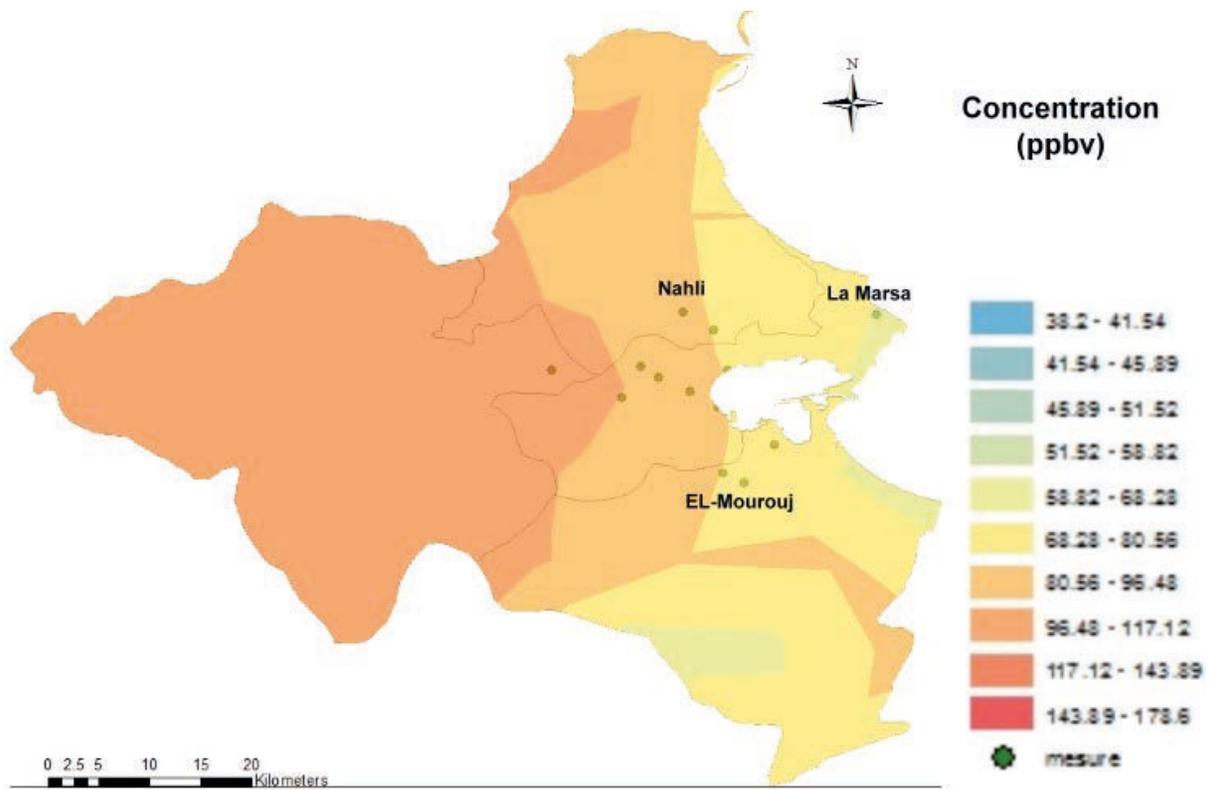


Figure 3. La carte de distribution des oxydes d'azote (NO_x) sur le Grand Tunis en concentrations maximales horaires (ppbv).
Distribution map of nitrogen oxides NO_x on Great Tunis in highest hourly concentrations (ppbv).

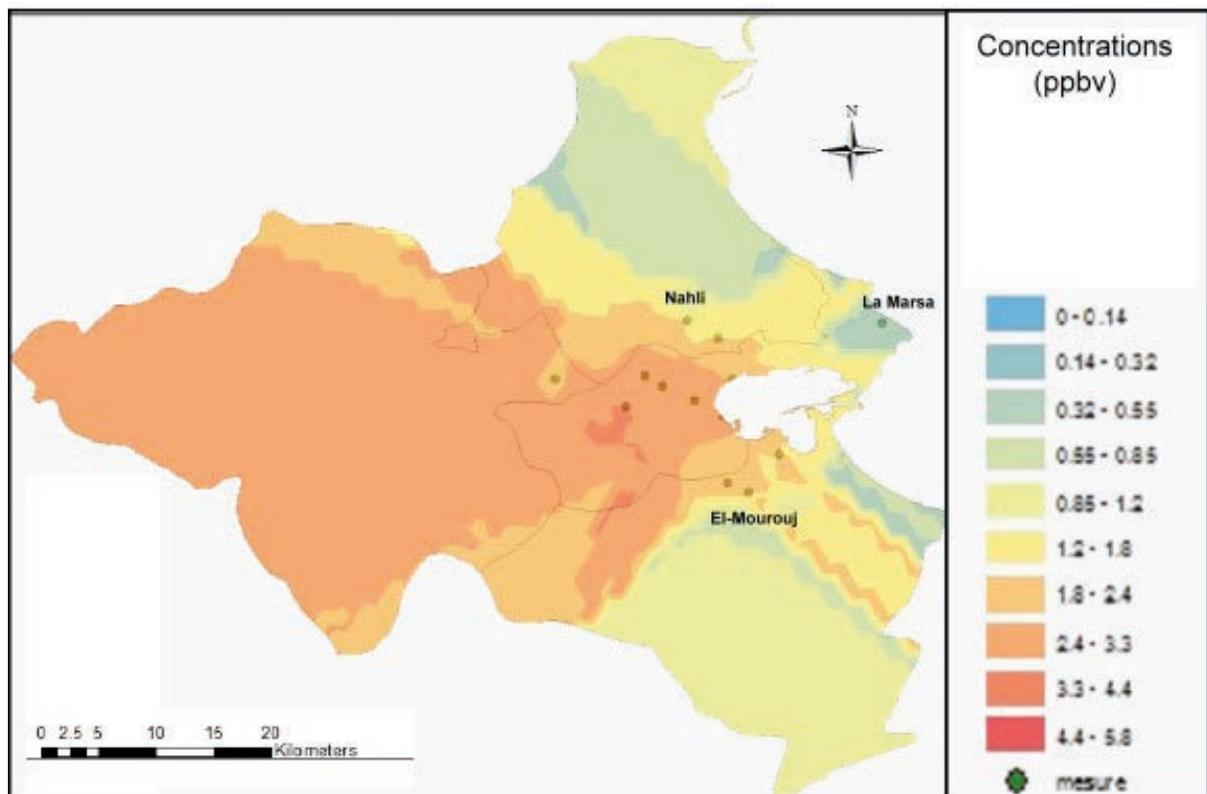


Figure 4. La carte de distribution du dioxyde de soufre (SO_2) sur le Grand Tunis en concentrations maximales horaires (ppbv).
Distribution map of sulphur dioxide SO_2 on Great Tunis in highest hourly concentrations (ppbv).

l'effet de serre. L'ozone est également un indicateur de la pollution photo-oxydante.

L'ozone est caractérisé par un temps de demi-vie plutôt court, de l'ordre de quelques jours à température ambiante et à l'état gazeux, et par une grande variabilité temporelle et spatiale. Cette demi-vie devient de l'ordre de quelques minutes en milieux aqueux. Ainsi, la concentration de l'ozone dans la troposphère va dépendre des conditions météorologiques et des paramètres atmosphériques : intensité de l'ensoleillement, température, humidité relative, piégeage de l'air pollué près du sol, production d'orage, transport par le vent et dynamique de la tropopause.

Les variations nyctémérales, qui sont les variations durant une alternance d'un jour et d'une nuit correspondant à un cycle biologique de 24 heures, des concentrations en ozone et en monoxyde d'azote ainsi que celles de la température, des radiations solaires et de l'humidité relative de l'air sont représentées sur la figure 5. Il apparaît que l'évolution des concentrations en ozone est opposée à celles du monoxyde d'azote NO et de l'humidité relative. Par contre, les variations des concentrations en ozone sont similaires à celles du rayonnement solaire et de la température.

En vue de mieux comprendre les relations entre les paramètres étudiés, une matrice de corrélation

est construite entre l'ozone (O_3), la température T, l'humidité relative de l'air HR, l'intensité de rayonnement solaire (RAD), le monoxyde d'azote (NO) et le dioxyde d'azote (NO_2).

La matrice de corrélation (tableau 1) indique une corrélation entre les concentrations en ozone et la température (0,736), entre la température et les radiations solaires (0,911), ainsi qu'entre les concentrations en monoxyde d'azote et l'humidité relative de l'air (0,732). Elle indique aussi des anti-corrélations entre les concentrations en ozone et celles en monoxyde d'azote (-0,985) et l'humidité relative (-0,754), et également entre la température et la concentration en monoxyde d'azote (-0,698). La forte anti-corrélation entre la température et l'humidité relative (0,965) est évidente puisqu'elle découle de l'expression même de l'humidité relative qui est le rapport de la pression de vapeur et de la pression de vapeur saturante, à une température donnée : une augmentation de la température entraînera une augmentation de la pression de vapeur saturante de l'eau et ainsi abaissera son humidité relative.

Afin d'affiner ces corrélations, extraire les paramètres les plus importants de ces analyses et leurs interactions, une Analyse en Composantes Principales (ACP) est appliquée à ces résultats. Préalablement à l'ACP, et pour pouvoir l'appliquer à ce cas d'étude, plusieurs analyses des résultats ont été

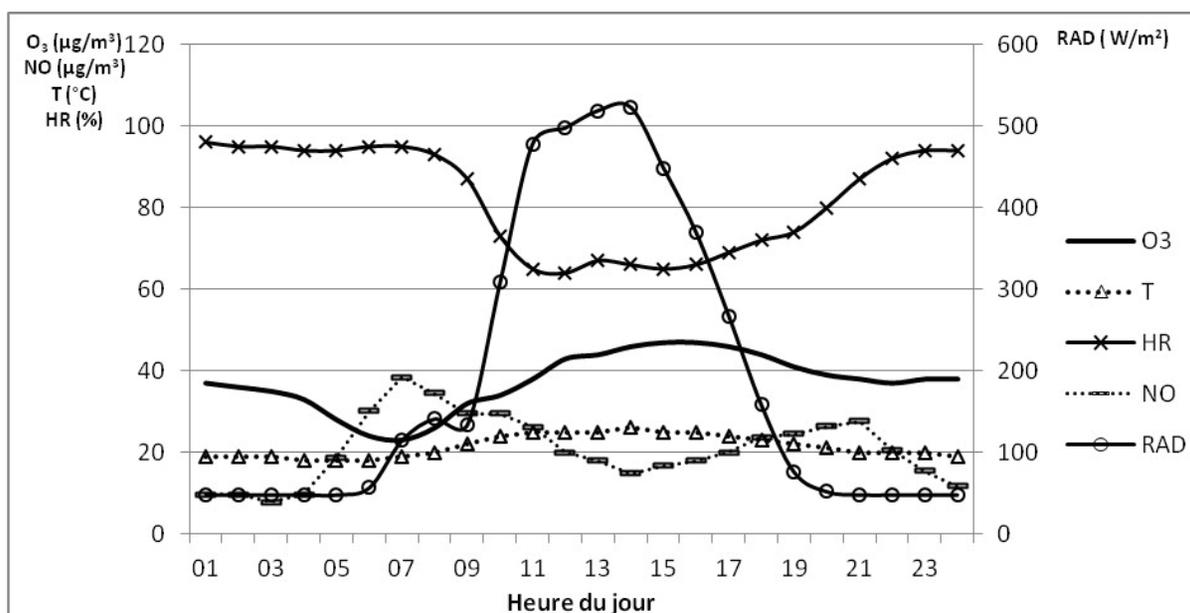


Figure 5. Variations nyctémérales des concentrations en ozone (O_3), de la température, de l'humidité relative atmosphérique (HR), du monoxyde d'azote (NO) et des radiations solaires (RAD) sur le Grand Tunis, analysées par la station fixe d'El-Mourouj durant l'année 2014.

Diel variations of ozone concentrations (O_3), temperature, relative atmospheric humidity (HR), nitrogen monoxide (NO) and solar radiations (RAD) on the Great Tunis monitored by the permanent station of El-Mourouj during 2014.

effectuées. La première analyse a consisté à vérifier si les données sont factorisables. L'observation de la matrice de corrélation (tableau 1) permet de vérifier que toutes les variables sont corrélées par des valeurs supérieures à 0,41, la majorité ayant des corrélations supérieures à 0,5 ; de plus, pour l'ensemble des échantillons et des composants chimiques étudiés, l'application de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) est validée par le test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) et Bartlett. L'indice de KMO est de 0,675, et donc supérieur à 0,5, tandis que le test de sphéricité de Bartlett a permis de définir l'indépendance des variables par une signification tendant vers zéro. Les données sont donc factorisables.

Deux composantes possédant des valeurs propres supérieures à 1 et expliquant 91,76 % de la variance totale ont été retenues respectivement pour l'ozone, la température, l'humidité relative, la radiation solaire, le dioxyde d'azote et le monoxyde d'azote dans le Grand Tunis. Elles sont représentées dans le cercle de corrélation (figure 6), défini par deux premières composantes principales. C'est la représentation graphique des variables en fonction de leurs coefficients de corrélation avec les composantes principales.

Ce cercle de corrélation est une bonne représentation de tous les paramètres par ses deux axes. La première composante, sur l'axe horizontal, et qui comprend 69,39 % de la variance, est expliquée par les trois paramètres corrélés : la concentration en ozone, la température et la radiation solaire. Ce cercle de corrélation montre, d'une part, une bonne corrélation entre la concentration en ozone, la température et la radiation solaire et, d'autre part, une anti-corrélation de ces trois paramètres avec l'humidité relative et la concentration en monoxyde d'azote. Tous ces paramètres apparaissent indépendants du paramètre dioxyde d'azote qui explique la deuxième

composante qui contribue à 22,38 % de la variance totale.

Les deux axes pourraient représenter les origines des polluants gazeux. Le premier axe pourrait représenter le phénomène de formation photochimique de l'ozone puisqu'il est bien représenté par les paramètres de l'ensoleillement (la température, la radiation solaire) et la concentration en ozone. Le signal météorologique moyen a été défini pour la Tunisie par Celle-Jeanton *et al.* (2001) : malgré le fait que la région étudiée est fortement soumise aux influences méditerranéennes du fait de sa position littorale, elle dénote en moyenne un excès en deutérium de 11 ‰, plus proche de celui qui caractérise l'Atlantique (10 ‰) que de celui de la Méditerranée occidentale (14 ‰). La circulation générale d'ouest qui caractérise le climat tunisien peut expliquer ce phénomène : 30 % des perturbations sont en effet issues directement de l'Atlantique, sans se recharger sur la Méditerranée. Dans cette région côtière du Nord de la Méditerranée, c'est la nuit que l'humidité relative de l'air est la plus élevée (96 % en moyenne), alliée à une baisse de la température (18 °C en moyenne). Cette conjonction va permettre la diminution de la concentration en ozone basal. En effet, dans l'eau pure, comme celle qui se trouve dans l'humidité de l'air, l'ozone réagit avec OH⁻ puis, suivant une série de réaction avec le radical hydroxyle formé, se décompose. La deuxième composante pourrait être l'indicateur de la pollution automobile puisqu'elle est uniquement représentée ici par le dioxyde d'azote, mais avec des réserves, car trop peu d'éléments l'expliquent.

Cette étude est en concordance avec les résultats qui prouvent une forte corrélation entre l'ozone et la radiation solaire (Latif *et al.*, 2012), d'une part, et l'ozone et la température, d'autre part (Melkonyan, 2012 ; Nishanth, 2012), ainsi qu'une anti-corrélation entre l'ozone et l'humidité relative avec un coefficient

Tableau 1. Matrice de corrélation entre ozone (O₃), de la température (T), de l'humidité relative atmosphérique (HR), du monoxyde d'azote (NO), du dioxyde d'azote (NO₂) et des radiations solaires (RAD).

Correlation Matrix of ozone (O₃), temperature (T), relative atmospheric humidity (HR), nitrogen monoxide (NO), nitrogen dioxide (NO₂) and solar radiations (RAD).

	O ₃	T	HR	RAD	NO	NO ₂
O ₃	1,000					
T	0,736	1,000				
HR	-0,754	-0,965	1,000			
RAD	0,565	0,911	-0,872	1,000		
NO	-0,985	-0,698	0,732	-0,547	1,000	
NO ₂	-0,422	0,018	-0,041	-0,066	0,479	1,000

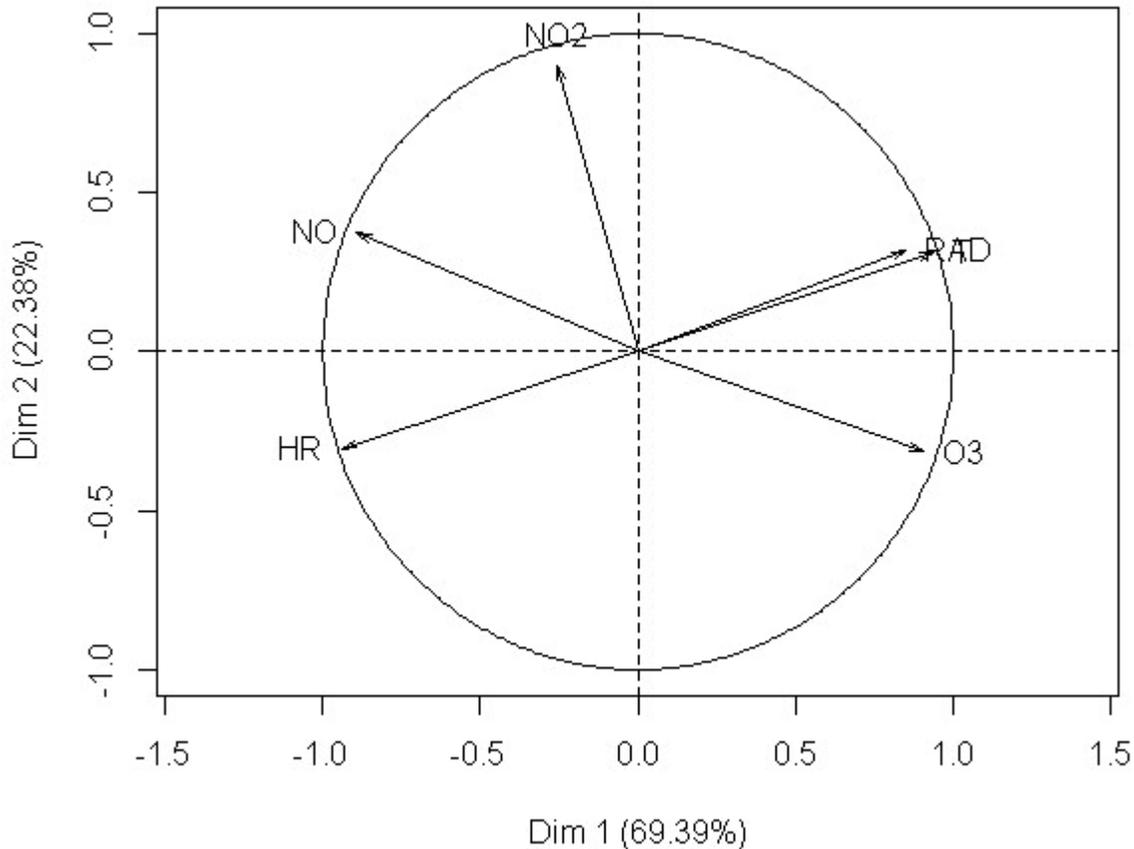


Figure 6. Cercle de corrélation sur les deux premières composantes principales.
Two dimensional diagram of the first two principal components.

de Pearson négatif de -0,31 entre eux. Dans l'étude de Nishanth (2012), la concentration en ozone troposphérique arrive à son maximum ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) entre 14 et 16 h, lorsqu'il y a une élévation de la température ambiante, ce qui sous-entend la corrélation directe entre les deux paramètres. En ce qui concerne la corrélation des trois paramètres de concentration en ozone, de température et de radiation solaire trouvée par l'Analyse en Composantes Principales, elle confirme le rôle conjoint de ces trois paramètres dans la formation photochimique de l'ozone.

5. Conclusion

Sur le grand Tunis, la représentation de la distribution spatiale des polluants primaires que sont les oxydes d'azote et le dioxyde de soufre indique une concentration majeure à proximité de leurs

sources, tandis que l'ozone, polluant secondaire, est surtout présent dans la couronne périurbaine de la zone d'étude. L'analyse en composantes principales appliquée aux composés gazeux et aux paramètres atmosphériques révèle que le phénomène de formation photochimique de l'ozone qui corréle les paramètres de la concentration en ozone, de la radiation solaire et de la température est anti-corrélé à celui de la destruction de l'ozone, représenté par les paramètres de concentration en monoxydes d'azote et humidité relative de l'air. Le paramètre de concentration en dioxydes d'azote apparaît indépendant de ce phénomène de formation/destruction d'ozone. Ces résultats pourront donner lieu à des recherches plus approfondies, particulièrement pour les résultats concernant les oxydes d'azote qui sont généralement exprimés ensemble ($\text{NO} + \text{NO}_2$) dans la majorité des études, mais qui apparaissent ici comme méritant des études disjointes en vue de mieux comprendre leurs occurrences, rôles et origines respectives.

Références bibliographiques

Azmi SZ, Latif MT, Ismail AS et al. (2010). Trend and status of air quality at three different monitoring stations in the Klang Valley, Malaysia. *Air Quality, Atmosphere and Health*, n° 3, p. 53-64.

Barret B, Ricaud P, Mari C et al. (2008). Transport pathways of CO in the African upper troposphere during the monsoon season: a study based upon the assimilation of spaceborne observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, n° 8, p. 3231-3246.

Boucouvala D, Bornstein R. (2003). Analysis of transport patterns during an SCOS97-NARSTO episode. *Atmospheric Environment*, n° 37, p. 73-94.

Celle-Jeanton H, Zouari K, Travi Y. et al. (2001). Caractérisation isoto-pique des pluies en Tunisie. Essai de typologie dans la région de Sfax. *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des planètes / Earth and Planetary Sciences*, n° 333, p. 625-631.

Charfi S et Dahech S. (2013). Dynamique spatio-temporelle de la température dans l'agglomération de Tunis : apport de la modélisation statistique et de l'imagerie spatiale. *GdR 3359 MoDyS - Rencontre jeunes chercheurs – 21-22 novembre, université de Franche-Comté (Frasne, 25), France.*

Che W, Zheng J, Wang S et al. (2011). Assessment of motor vehicle emission control policies using Model-3/CMAQ model for the Pearl River Delta region, China. *Atmospheric Environment*, n° 45, p. 1740-1751.

Civerolo K, Hogrefe C, Lynn B et al. (2007). Estimating the effects of increased urbanization on surface meteorology and ozone concentrations in the New York City metropolitan region. *Atmospheric Environment*, n° 41, p. 1803-1818.

Décret n° 2010-1250 du 21 octobre 2010 relatif à la qualité de l'air qui modifie les articles R. 222-13 à R. 222-18 du code de l'environnement, directive française.

El Melki T. (2007). Inversions thermiques et concentrations de polluants atmosphériques dans la basse troposphère de Tunis. *Climatologie*, n° 4, p. 105-129.

Fernández-Fernández MI, Gallego MC, García JA et al. (2011). A study of surface ozone variability over the Iberian Peninsula during the last fifty years. *Atmospheric Environment*, n° 45, p. 1946-1959.

Ghazali NA, Ramli NA, Yahaya AS et al. (2010). Transformation of nitrogen dioxide into ozone and prediction of ozone concentrations using multiple linear regression techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, n° 165, p. 475-489.

Guicherit R, Roemer M. (2000). Tropospheric ozone trends. *Chemosphere- Global Change Science*, n° 2, p. 167-183.

Guide de lecture des directives européennes 2008/50/CE et 2004/107/CE (octobre 2009) Surveillance de la qualité de l'air ambiant – document ADEME n° 6534 - ISBN 978-2-35838-028-7.

Joly M et Peuch VH (2012). Objective classification of air quality monitoring sites over Europe. *Atmospheric Environment*, n° 47, p. 111-123.

Latif MT, Huey LS, Juneng L. (2012). Variations of surface ozone concentration across the Klang Valley, Malaysia. *Atmospheric Environment*, n° 61, p. 434-445.

Lin CY, Wang Z, Chou CK Charles et al. (2007). A numerical study of an autumn high ozone episode over southwestern Taiwan. *Atmospheric Environment*, n° 41, p. 3684-3701.

Luo C, St John JC, Xiuji Z et al. (2000). A nonurban ozone air pollution episode over eastern China: observations and model simulations. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, n° 105, p. 1889-1908.

Melkonyan A, Kuttler W. (2012). Long-term analysis of NO, NO₂ and O₃ concentrations in North Rhine-Westphalia, Germany. *Atmospheric Environment*, n° 60, p. 316-326.

Minoura H, Ito A. (2009). Observation of the primary NO₂ and NO oxidation near the trunk road in Tokyo. *Atmospheric Environment*, n° 44, p. 23-29.

Mittal ML, Hess PG, Jain SL et al. (2007). Surface ozone in the Indian region. *Atmospheric Environment*, n° 41, p. 6572-6584.

Nishanth T, Praseed KM, Rathnakaran K et al. (2012). Atmospheric pollution in a semi-urban, coastal region in India following festival seasons. *Atmospheric Environment*, n° 47, p. 295-306.

Norme Tunisienne NT 106.04 (1994) Relative aux valeurs limites et des valeurs guides pour certaines substances polluantes continues dans l'air ambiant.

Saunois M. (2009). Bilan de l'ozone troposphérique sur le continent africain. Thèse de Doctorat, université de Toulouse, France.

Sillman S. (1999). The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments. *Atmospheric Environment*, n° 33, p. 1821-1845.

Zhang YN, Xiang YR, Chan LY et al. (2011). Procuring the regional urbanization and industrialization effect on ozone pollution in Pearl River Delta of Guangdong, China. *Atmospheric Environment*, n° 45, p. 4898-4906.

Zhou K, You-hua Y, Qiang L et al. (2007). Evaluation of ambient air quality in Guangzhou, China. *Journal of Environmental Sciences*, n° 19, p. 432-437.