

EVALUATION DE LA POLLUTION GAZEUSE MAJEURE ET DES INTERACTIONS LOCALES EN O₃, NO_x ET SO₂ A TUNIS (TUNISIE)

Hassen KCHIH^{a,b}, Semia CHERIF^{b*}

^aAgence Nationale de la Protection de l'Environnement, Centre Urbain Nord, Belvédère Tunisie.

^bUR Chimie des Matériaux et de l'Environnement UR11ES25, ISSBAT, Université de Tunis El Manar, Tunisie

(Reçu: 14 Novembre 2014, accepté: 09 Juillet 2015)

RESUME: La modélisation des phénomènes atmosphériques locaux étant difficile, il est important de suivre la qualité de l'air pour comprendre et éventuellement remédier à la pollution atmosphérique. Ce travail traite de l'étude de la qualité de l'air en milieu urbain à Tunis (Tunisie). Elle est réalisée pour les polluants gazeux les plus importants à savoir l'ozone O₃, les oxydes d'azote NO_x et le dioxyde de soufre SO₂. Les variations sur 24 heures ont été suivies, ce qui a permis de mettre en évidence les phénomènes atmosphériques locaux ainsi que les relations entre les paramètres étudiés.

Mots-clés: pollution urbaine, O₃, NO_x, SO₂, Grand Tunis.

ABSTRACT : Modelization of local atmospheric quality being difficult, it is important to monitor the major air pollutants in order to know, understand and eventually remedy the pollutions. The monitoring of the air quality in urban area is done in Tunis, capital of Tunisia, from 2003 to 2014, for the major gaseous pollutants: tropospheric ozone O₃, nitrogen oxides NO_x and sulphur dioxide SO₂. The resulting diel patterns highlight the local atmospheric phenomena as well as the relationship between the studied parameters.

Key words: urban pollution, O₃, NO_x, SO₂, Great Tunis.

INTRODUCTION

Depuis quelques années, la qualité de l'air est devenue l'objet d'un nombre croissant de recherches, ainsi qu'un sujet de débat dans le monde entier, visant à mettre en évidence les effets nocifs de la pollution de l'air sur la santé humaine, les récoltes agricoles, les bâtiments et les écosystèmes.

L'obtention de données fiables concernant les sources et les impacts de la pollution atmosphérique sur l'environnement [1] fait appel à de nombreuses disciplines telles que la chimie des polluants [2], les sciences de la Terre pour le comportement environnemental des contaminants [3], et l'épidémiologie par les études des impacts sur la santé publique [4].

Plusieurs polluants atmosphériques sont diffusés par des sources fixes, ce sont les

émissions par des sources ponctuelles, par exemple ceux rejetés par la cheminée d'une centrale thermique. Les émissions par des sources mobiles ou émissions par des sources linéaires sont le fait notamment des véhicules automobiles y compris les autobus et les poids lourds mais également les moyens de transport ferroviaires et maritimes [5]. Les polluants les plus courants sont : les particules, les oxydes d'azote NO_x comprenant le NO et le NO₂ [6], le dioxyde de soufre (SO₂), le monoxyde de carbone (CO), l'ozone troposphérique (O₃), les nitrates et sulfates aérosols et les substances cancérigènes potentielles ou avérées qui comprennent entre autres plusieurs métaux lourds tels que le nickel, le chrome et l'arsenic ainsi que le benzène, les dioxines et furanes ou les hydrocarbures aromatiques polycycliques. Les polluants gazeux majeurs sont le dioxyde

* Correspondant, email : semiacherif@yahoo.fr

de soufre, les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et l'ozone [7].

Les rejets de dioxyde de soufre SO_2 sont essentiellement dus à la combustion de fossiles soufrés tels que le charbon, la lignite, le coke de pétrole, les fuels lourds, le fuel domestique ou le gazole. Les plus gros émetteurs en sont généralement les centrales thermiques, les raffineries et toutes les grandes installations de combustion. Par contre, le gaz naturel, le gaz de pétrole liquéfié (GPL) ou le bois sont des combustibles peu ou pas soufrés dont la combustion émettra peu ou pas de dioxyde de soufre [8]. Certains procédés industriels émettent également des oxydes de soufre par exemple pour la production d'acide sulfurique H_2SO_4 , la production de la pâte à papier ou le raffinage du pétrole. L'origine naturelle du dioxyde de soufre dans l'atmosphère peut être volcanique.

Les émissions d'oxydes d'azote comprenant le monoxyde d'azote NO et le dioxyde d'azote NO_2 ont également lieu durant l'utilisation de combustibles fossiles. Ils peuvent également être issus de certains procédés industriels tels que la production d'acide nitrique ou la fabrication d'engrais azotés. Les origines naturelles peuvent être volcaniques ou les feux de forêts. Le monoxyde d'azote n'est pas toxique pour l'homme aux concentrations auxquelles il se trouve habituellement dans l'environnement qui se situent entre 10 et 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tandis que le dioxyde d'azote est un gaz irritant pour les bronches au delà de 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans l'air ambiant [9].

La molécule d'ozone, aux propriétés oxydantes, est présente majoritairement dans la stratosphère où elle joue le rôle important de filtre des rayons ultra-violet de type C et de type B, protégeant ainsi la biosphère terrestre. Dans la troposphère, la molécule d'ozone est radiativement active dans l'infrarouge et participe à l'effet de serre additionnel. Elle est toxique pour les plantes à partir de 80ppbv, a des effets nocifs sur les voies respiratoires à partir de 120ppbv, une concentration devenue courante actuellement, et devient mortelle pour les êtres humains à partir de 1ppmv. L'ozone

n'est pas directement émis par des processus naturels ou par des activités humaines. Dans la troposphère, sa production est photochimique et se produit à partir de divers gaz à l'état de traces tels que les composés carbonés dont le monoxyde de carbone et les hydrocarbures (surtout le méthane) ainsi que les composés azotés dont essentiellement les oxydes d'azote NO_x . Ceux-ci, dits précurseurs d'ozone, sont émis dans l'atmosphère par la végétation, les sols ou les processus de combustions de la biomasse et fossile [10].

La dispersion et le transport des polluants en général et notamment de l'ozone dans l'air dépendent de l'état de l'atmosphère et des conditions météorologiques telles que les turbulences et la stabilité atmosphériques, la vitesse et la direction du vent, l'ensoleillement et l'humidité relative de l'air [11,12]. L'ensoleillement provoque un réchauffement des sols et des surfaces qui provoque des phénomènes de convection à l'origine de mouvements verticaux et horizontaux de l'atmosphère. L'ensoleillement agit également sur la chimie des polluants, les rayons solaires et particulièrement les ultra-violets intervenant dans les réactions photochimiques dans l'atmosphère, ce qui favorise par exemple la formation de l'ozone troposphérique.

De façon générale, les concentrations les plus élevées en ozone troposphérique se trouvent aux alentours du centre des villes à une distance d'environ 20 Km [13,14,15]. De plus, les concentrations en ozone sont également plus importantes dans les milieux ruraux que dans les milieux urbains ou périurbains. Parmi les NO_x , qui sont essentiellement produits par la circulation automobile dans les milieux urbains [16,17,18], le monoxyde d'azote réagit très rapidement avec l'ozone [19,20], ce qui provoque la décroissance momentanée des concentrations moyennes en ozone dans l'air ambiant. Par conséquent, des concentrations plus élevées d'ozone sont susceptibles de se retrouver en aval des grandes agglomérations urbaines selon la provenance du vent. [21,22,15].

Dans cette étude, la qualité de l'air en milieu urbain de Tunis, capitale de Tunisie, est suivie pour les polluants gazeux les plus importants à savoir l'ozone O_3 , les oxydes d'azote NO_x et le dioxyde de soufre SO_2 . L'évolution sur 24 heures (sur un cycle de 24 heures, nocturne-diurne) ont été suivies ce qui a permis de mettre en évidence les phénomènes atmosphériques locaux ainsi que les relations entre les paramètres étudiés.

MATERIEL ET METHODE

1. Zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la métropole Tunis, la capitale de la Tunisie, pays situé au Nord de l'Afrique, sur la rive Sud de la mer Méditerranée. Sa superficie est de 2726 km², avec une population de 2,5 million d'individus. Cette zone contribue à hauteur de 30% à la pollution totale du pays.

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 1), répartis sur toute la zone d'étude. 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 températures, d'humidités relatives et d'ensoleillement.

2. Echantillonnage, 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 direction du vent, de la température et de l'humidité relative de l'air ont également été suivis.

Les échantillonnages réalisés à partir d'une station mobile de suivi de la qualité de l'air ont été effectués sur chacun des quatorze sites choisis durant une semaine (parfois deux), au cours de l'année 2003 puis de l'année 2014.

Les concentrations en ozone O_3 , oxydes d'azote NO_x et en dioxyde de soufre SO_2 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.

Deux stations fixes ont été choisies pour l'analyse de l'ozone à cause des fréquents dépassements des normes observées dans ces zones pour ce polluant. L'une se situe dans la zone Ariana Nord (appelée Nahli) et l'autre dans Mourouj. Les protocoles d'échantillonnage sont les mêmes que pour les stations mobiles. Les résultats présentés sous forme de variations sur 24 heures sont établis pour des moyennes annuelles pour une heure donnée, pour les 24h. Ils concernent les échantillonnages durant les années 2009 et 2013-2014. Les variations annuelles sont exprimées pour les pics d'ozone annuels.

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 SO_2 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.

RESULTATS ET DISCUSSION

1. Les distributions des concentrations en polluants

La distribution des trois polluants atmosphériques gazeux étudiés, l'ozone O_3 , les oxydes d'azote NO_x et le dioxyde de soufre SO_2 est étudiée sur toute la métropole Tunis.

L'ozone. La carte de distribution en ozone troposphérique (Figure 1) indique des maxima horaires oscillant entre 10 et 121 ppbv (Tableau I). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées sur le site 13, qui correspond au parc naturel Nahli (112 ppbv) et sur le site 11, au parc urbain Mourouj (121 ppbv) qui sont deux sites périurbains éloignés d'environ 20 km du centre ville. Ces concentrations en ozone se trouvent à la limite des normes tunisiennes relatives à l'air ambiant NT106.04 [23], identiques à la directive 2008/50/CE du Parlement européen [24], et à la directive française [25], pour les limites relatives à la santé (120 ppbv) mais se trouvent dans les limites des valeurs guides relatives au bien être (77-102 ppbv). La moyenne des maxima la plus faible est enregistrée sur le site 14, à la Marsa (10 ppbv), en bordure de mer.

En dehors du point 13, les concentrations les plus élevées en ozone se situent dans la zone Sud-Est de la région étudiée. Ceci pourrait être expliqué par la combinaison de plusieurs effets. D'une part, l'ozone est connu comme étant un polluant secondaire issu de réactions photochimiques impliquant d'autres polluants tels que les dioxydes d'azote. Ces polluants sont émis par la circulation automobile en milieu urbain de Tunis, la capitale, et par les activités industrielles. D'autre part, ces polluants sont déplacés par les masses d'air provenant du Nord-Ouest, vents dominants dans cette région, qui

survolent les zones industrielles et fortement urbanisées et transformés par effet photochimique, durant quelques heures, en direction des zones situées au Sud-Est. Les fortes concentrations en ozone trouvées dans la région 13 pourrait s'expliquer par le fait que la station de mesure se trouve protégée des vents dominants du côté Nord-Ouest par une colline, créant une stagnation des masses d'air et permettant des réactions photochimiques et une accumulation locale des polluants dont l'ozone. Les faibles concentrations en ozone trouvées dans la région 14, proche de la région 13, confirme ces hypothèses car c'est une région côtière, ouverte sur la mer méditerranéenne et balayée par les vents dominants.

Les oxydes d'azote. La carte de distribution des oxydes d'azote (Figure 2) indique des maxima horaires oscillant entre 38 et 179 ppbv (Tableau I). Toutes ces valeurs se trouvent en deçà des valeurs guides relatives au bien-être pour le dioxyde d'azote de 212 ppbv et *a fortiori* aux valeurs limites relatives à la santé de 350 ppbv de la norme tunisienne NT 106.04 [23]. En ce qui concerne les valeurs guide françaises, elles ne concernent également que le

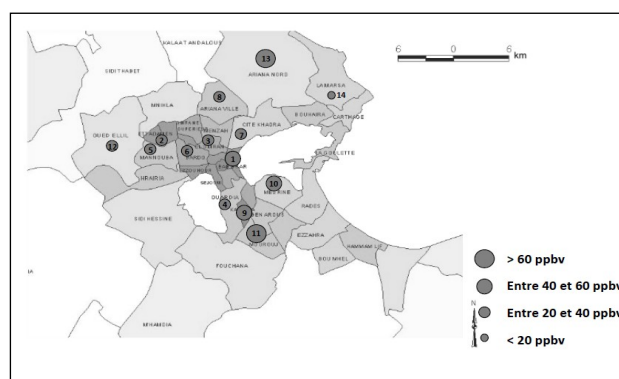


Figure 1 : La carte de distribution de l'ozone O_3 sur le Grand Tunis

Tableau I : Concentrations maximales sur des moyennes horaires en ozone (O_3), oxydes d'azote (NO_x) et dioxyde de soufre (SO_2) sur le Grand Tunis (ppbv) durant l'année 2014.

Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
O_3	40	37	34	35	36	32	34	40	42	44	121	39	112	10
NO_x	47	44	129	40	38	171	56	114	94	66	70	179	64	47
SO_2	8	13	11	8	11	7	2	3	7	1	7	1	1	1

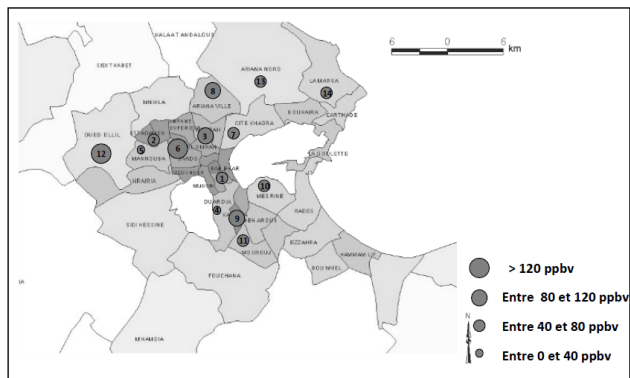


Figure 2 : La carte de distribution des oxydes d'azote NOx sur le Grand Tunis

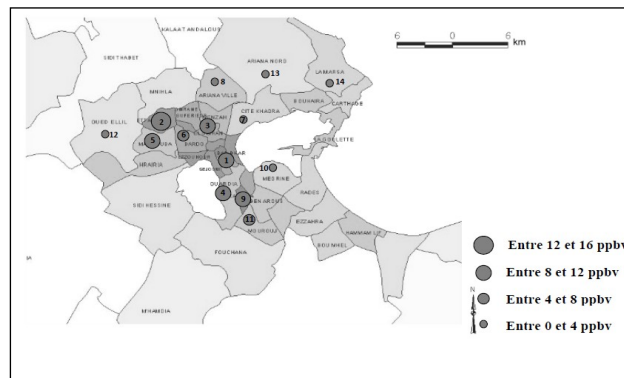


Figure 3 : La carte de distribution du dioxyde de soufre SO₂ sur le Grand Tunis

dioxyde d'azote [25], avec un seuil d'information et de recommandations de 104 ppbv, identique à la limite de la directive 2008/50/CE du Parlement européen de Surveillance de la qualité de l'air ambiant [24], qui pourrait donc être dépassé, à condition de vérifier le pourcentage en NO et en NO₂ dans les NOx mesurés. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées sur le site 12 qui correspond à un carrefour à Oued Ellil (179 ppbv) et sur le site 6 qui correspond au Bardo (171 ppbv) à un point de prélèvement situé au milieu d'un important carrefour. Ces deux sites se trouvent à des endroits d'intense circulation automobile. La valeur la plus faible, 38 ppbv, est enregistrée sur le site 5 périurbain et distant d'environ 20 km du centre ville. Les NOx provenant majoritairement de la combustion des combustibles fossiles, dans notre étude, ils sont probablement originaires du transport routier puisque leurs concentrations sont élevées dans les régions où ce facteur prédomine et minimales dans les régions moins encombrées du point de vue du transport routier.

Le dioxyde de soufre La carte de distribution du dioxyde de soufre (Figure 3) indique des valeurs de maxima horaires en SO₂ situés entre 1 et 13 ppbv (Tableau I).

Ces valeurs sont largement inférieures aux valeurs guides relatives au bien-être de 41 ppbv relatives à la norme tunisienne NT NT106.04 [23], elles sont également bien en-deça des seuils d'informations et de recommandations du décret français, de 112 ppbv [25], et de la valeur limite de 131 ppbv de

la directive 2008/50/CE du Parlement européen sur la Surveillance de la qualité de l'air ambiant [24]. Nous pouvons remarquer que la zone où les concentrations sont les plus élevées, entre 7 et 13 ppbv, se situe au centre de la zone d'étude là où la circulation automobile est la plus intense mais également vers la partie Sud-Est où se trouvent les zones industrielles, le dioxyde de soufre, polluant gazeux primaire, étant issu directement de combustions fossiles. Les régions à faibles concentrations en dioxydes de soufre se situent à l'extrême Ouest et dans la partie Nord Ouest de la zone analysée, en périphérie des zones précédentes. Ces régions sont réputées peu industrielles et peu soumises à la circulation automobile, relativement aux zones centrales.

2. Les interactions des polluants gazeux et des paramètres atmosphériques

La dispersion et le transport de l'ozone troposphérique dépendent de l'état de l'atmosphère et des conditions météorologiques, l'évolution sur 24 heures des concentrations en ozone ont été suivies parallèlement à divers paramètres météorologiques tels que la température, les radiations solaires et l'humidité relative. Les concentrations en ozone varient entre 23 et 47 µg/m³. Elles sont les plus basses à l'aube puis augmentent durant la journée pour atteindre un maximum l'après-midi. Ces variations en ozone sont très proches des variations de la température (Figure 4), ce dernier paramètre oscillant entre 18 et 26°C, et dans une certaine mesure des variations des radiations solaires

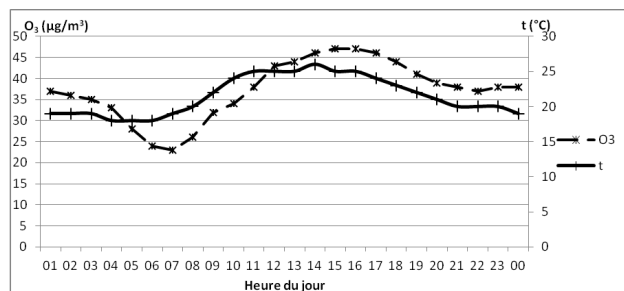


Figure 4 : Evolution sur 24 heures des concentrations en ozone (O_3) et de la température (t) sur le Grand Tunis durant l'année 2014

(Figure 5) qui oscillent entre 48 et 522 W/m^2 . Ceci est expliqué par les réactions photochimiques qui favorisent la formation de l'ozone et qui sont induites par les rayonnements solaires et les hautes températures au cours de la journée. L'ozone est certainement le polluant atmosphérique le plus marquant en Tunisie puisque c'est un pays qui se caractérise par un ensoleillement marqué et des températures élevées surtout en été. Les concentrations en ozone de surface étant relativement élevées, souvent supérieures à 60 ppbv, la relation avec la température est ici bien observée, les concentrations en ozone basal (ou naturel) auraient été inférieures aux valeurs observées.

Les humidités relatives de l'air sont également assez élevées, entre 64 et 96 %. Elles apparaissent anti-corrélées à la concentration en ozone (Figure 6). Or s'il est connu qu'une humidité relative élevée abaisse la concentration en ozone basal, il est observé qu'ici les variations l'humidité relative sont opposées aux variations en ozone.

Dans l'eau pure, comme celle qui se trouve

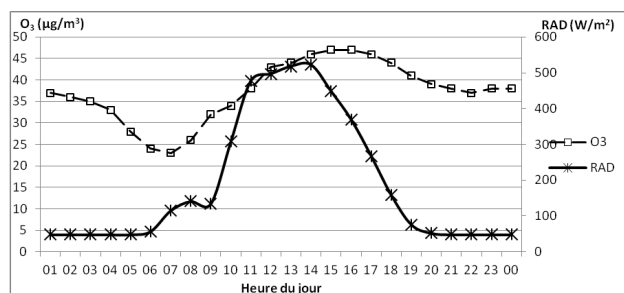


Figure 5 : Evolution sur 24 heures des concentrations en ozone (O_3) et des radiations solaires (RAD) sur le Grand Tunis durant l'année 2014.

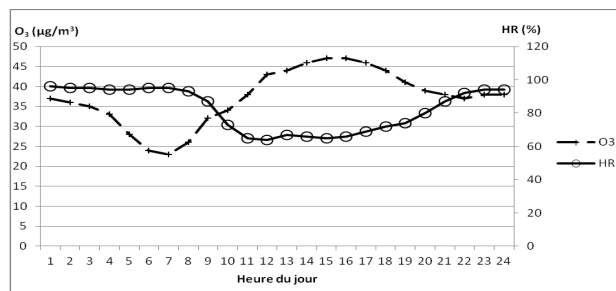
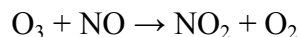


Figure 6 : Evolution sur 24 heures des concentrations en ozone (O_3) et de l'humidité relative atmosphérique (HR) sur le Grand Tunis durant l'année 2014.

dans l'humidité de l'air, l'ozone réagit avec OH^- puis, suivant une série de réaction, avec le radical hydroxyle formé, ce qui favorise sa décomposition. Ainsi, si l'humidité relative de l'atmosphère est suffisamment élevée, l'ozone est détruit, d'où sa diminution au cours du temps.

Le même type d'anti-relation est observé entre l'ozone et le monoxyde d'azote (Figure 7). Si l'atmosphère est suffisamment concentrée en NO, l'ozone est détruit selon la réaction :



cette réaction contribue alors à limiter la concentration en ozone.

REFERENCES

- [1] J.W. Gregg, C.G. Jones, T.E. Dawson, *Nature.*, **2003**,424, 183-187.
- [2] R. Guicherit, M. Roemer, *Chemosphere.*, **2000**,2, 167-183.
- [3] X. Wang, D.L. Mauzerall, *Atmos. Environ.*, **2004**,38, 4383-4402.
- [4] J. Fuhrer, *Naturwissenschaften.*, **2009**,96, 173-194.
- [5] T. Nishanth, K.M. Praseed, K. Rathnakaran, M.K. Sathesh Kumar, R. Ravi Krishna, K.T. Valsaraj, *Atmos. Environ.*, **2012**,47, 295-306.

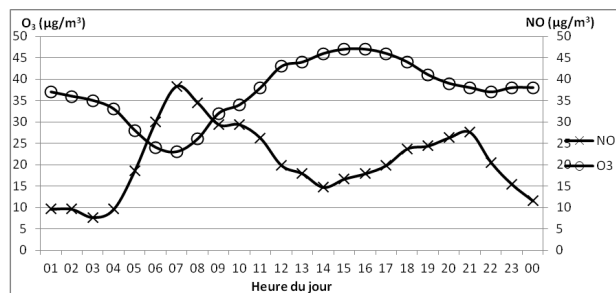


Figure 7 : Evolution sur 24 heures des concentrations en ozone (O_3) et en monoxyde d'azote (NO) sur le Grand Tunis durant l'année 2014.

- [6] A. Melkonyan, W. Kuttler, *Atmos. Environ.*, **2012**,*60*, 316-326.
- [7] K. Zhou, Y. You-hua, L. Qiang, L. Ai-jun, P. Shao-lin, *J. Environ. Sci.*, **2007**,*19*, 432-437.
- [8] M. Joly, V.H. Peuch, *Atmos. Environ.*, **2012**,*47*, 111-123.
- [9] Y.N. Zhang, Y.R. Xiang, L.Y. Chan, C.Y. Chan, X.F. Sang, R. Fu, H.X. Wang, *Atmos. Environ.*, **2011**,*45*, 4898-4906.
- [10] M. Saunois, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, France, **2009**.
- [11] D. Boucouvala, R., Bornstein, *Atmos. Environ.*, **2003**,*37*, 73-94.
- [12] C.Y. Lin, Z. Wang, Chou, C.K. Charles C.C. Chang, S.C. Liu, *Atmos. Environ.*, **2007**,*41*, 3684-3701.
- [13] S. Sillman, *Atmos. Environ.*, **1999**,*33*, 1821-1845.
- [14] B. Barret, P. Ricaud, C. Mari, J.L. Attié, N. Boussez, B. Josse, E. Le Flochmoën, N.J. Livesey, S. Massart, V.H. Peuch, A. Piacentini, B. Sauvage, V. Thouret, J.P. Cammas, *Atmos. Chem. Phys.*, **2008**,*8*, 3231-3246.
- [15] M.I. Fernández-Fernández, M.C. Gallego, J.A. García, F.J. Acero, *Atmos. Environ.*, **2011**,*45*, 1946-1959.
- [16] M.L. Mittal, P.G. Hess, S.L. Jain, B.C. Arya, C. Sharma, *Atmos. Environ.*, **2007**,*41*, 6572-6584.
- [17] H. Minoura, A., Ito, *Atmos. Environ.*, **2009**,*44*, 23-29.
- [18] W. Che, J. Zheng, S. Wang, L. Zhong, A. Lau, *Atmos. Environ.*, **2011**,*45*, 1740-1751.
- [19] K. Civerolo, C. Hogrefe, B. Lynn, J. Rosenthal, J.Y. Ku, W. Solecki, J. Cox, C. Small, C. Rosenzweig, R. Goldberg, K. Knowlton, P. Kinney, *Atmos. Environ.*, **2007**,*41*, 1803-1818.
- [20] S.Z. Azmi, M.T. Latif, A.S. Ismail, L. Juneng, A.A. Jemain, *Air Quality, Atmos. Health.*, **2010**,*3*, 53-64.
- [21] C. Luo, J.C. St John, Z. Xiuji, K.S. Lam, T. Wang, W.L. Chameides, *J. Geophys. Res.*, **2000**,*105*, 1889-1908.
- [22] N.A. Ghazali, N.A. Ramli, A.S. Yahaya, N.F.F.M. Yusof, N. Sansuddin, W.A. Al Madhoun, *Environ. Monit. Assess.*, **2010**,*165*, 475-489.
- [23] Norme Tunisienne NT 106.04 Relative aux valeurs limites et des valeurs guides pour certaines substances polluantes continues dans l'air ambiant, **1994**.
- [24] 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.
- [25] 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.